МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харьківський політехнічний інститут»

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії

№ 43 (1086) 2014

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ «ХПІ» 2014

Вісник Національного технічного університету «ХПІ»
Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086)– 220 с.

Державне видання
Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». внесено до «Переліку наукових Фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого постановою президії ВАК «України від 26 травня 2010 р. №1 – 05/4. (Бюлетень ВАК України №6, 2010 р. стор. 3 № 20)

Координаційна рада:
Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. **(голова)**
К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. **(секретар)**
А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, чл. -кор. НАНУ, д-р техн. наук, проф.; Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дмитрієнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепіков, д-р техн. наук, проф.; С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Николаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. Тимофєєв, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:
Відповідальний редактор: А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.
Заступник відповідального редактора: Ю. О. Плєснецов, канд. техн. наук, ст.н.с.
Відповідальний секретар: В. М. Левченко, канд. тех. наук, доц.
Члени редколегії: І. С. Алієв, д-р техн. наук, проф., Г. А. Баглюк, д-р техн. наук, проф.; Бар Рюдигер, д-р техн. наук, проф.; О. М. Головко, д-р техн. наук, проф.; В. В. Драгобецький, д-р техн. наук, проф.; В. О. Євстратов, д-р техн. наук, проф.; С. В. Єршов, д-р техн. наук, проф.; В. Л. Калюжний, д-р техн. наук, проф.; В. К. Лобанов, д-р техн. наук, проф.; М. Є. Тараненко, д-р техн. наук, проф.; Є. М. Смирнов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; В. А. Тітов, д-р техн. наук, проф.; О. І. Тришевський, д-р техн. наук, проф.; С. В. Федоров, д-р техн. наук, проф.; Є. А. Фролов, д-р техн. наук, проф.; В. Хомберг, д-р техн. наук, проф.; В. В. Чигиринський, д-р техн. наук, проф.

У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії», включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ «ХПІ»
Протокол № 9 від 31 жовтня 2014 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2014

УДК 621.777.01

Л. И. АЛИЕВА, канд. техн. наук, доц. ДГМА;
А. В. ШКИРА, аспирант, ДГМА;
К. В. ГОНЧАРУК, аспирант, ДГМА, Краматорск

ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ТРЕХСТОРОННЕГО КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

Рассмотрен процесс комбинированного трехстороннего выдавливания полой детали. Моделирование проводилось с целью определения предельного формоизменения в условиях холодного деформирования заготовок из алюминиевого сплава АД31. Проанализировано напряжённо-деформированное состояние с учетом влияния основных технологических параметров. Установлена наиболее опасная зона, где будет наблюдаться разрушение детали, и определено значение критической степени деформации.

Ключевые слова: комбинированное выдавливание, ресурс пластичности, фланец, разрушение.

Введение. В процессе холодного пластического деформирования наряду с упрочнением металла, происходит накопление в нём поврежденностей, приводящее к разуплотнению материала и снижению показателей остаточной пластичности. В результате этого наблюдается ухудшение служебных свойств изделий, вплоть до разрушения заготовок в процессе пластической обработки или изделий при эксплуатации. Поэтому обеспечение качества изделий при обработке методами ОМД невозможно без оценки способности металлов деформироваться без разрушения или без оценки степени исчерпании ресурса пластичности материала заготовки [1–3].

Главным фактором, влияющим на деформируемость металла в условиях холодного деформирования, является преобладающая в очаге деформации схема напряжённо-деформированного состояния (НДС). Зависимость пластичности от параметров, характеризующих схему напряжённого состояния, называют диаграммой пластичности. При деформировании, когда показатель напряжённого состояния не остаётся постоянным, деформируемость принято оценивать на основе так называемых критериев разрушения Ψ. Сущность критериев разрушения заключается в применении модели накопления поврежденности металла, зависящей от величины накопленной деформации и показателя напряжённого состояния. Разрушение материала наступает при достижении $\Psi = 1$.

Используя информацию о НДС материала и обоснованно применив критерии разрушения, можно определить величину использованного и

© Л.И. Алиева, А.В. Шкира, К.В. Гончарук , 2014

остаточного ресурсов пластичности и прогнозировать качество изделий, производимых методами холодного деформирования.

Методика и результаты исследования. Целью работы является определение степени исчерпания ресурса пластичности при получении детали комбинированным выдавливанием (рис. 1) на основе результатов, полученных методом конечных элементов.

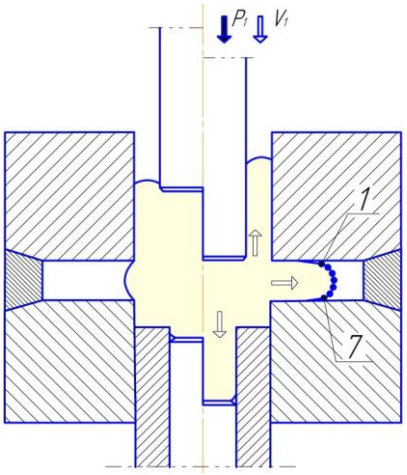


Рис.1 – Схема процесса комбинированного трехстороннего выдавливания с нанесенными трассируемыми точками на торце фланца (1–7)

Моделирование комбинированного процесса выдавливания проводилось в программном продукте QForm 2D (рис. 2). Граничные условия для осесимметричной задачи были заданы в следующем виде: упрочнение алюминиевого материала АД31 описано кривой упрочнения $\sigma_s = 191.55 \cdot e^{0,202}$МПа при скорости деформирования $0,25\,с^{-1}$, плотность материала $2800\ кг/м^3$; модуль Юнга 71000 МПа; коэффициент Пуассона 0,3; коэффициент трения по Леванову $\mu_s = 0,16$; скорость перемещения инструмента $1 мм/с$; инструмент абсолютно жесткий.

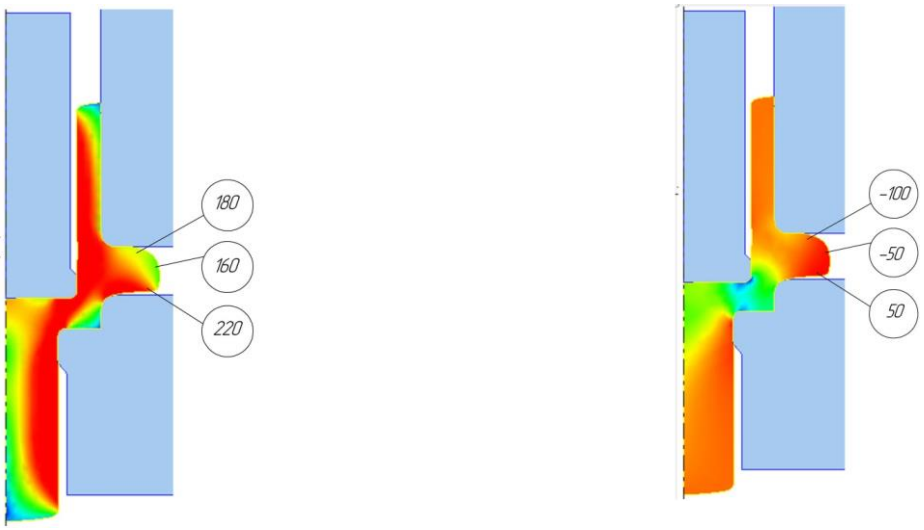
Проведя моделирование процесса выдавливания, было установлено, что граница разделения течения проходит по центру заготовки. На торцах фланца образуется сфера, что является следствием притормаживания наружных слоев металла (которые соприкасаются с инструментом) за счет контактного трения.

Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния были использованы для оценки значений использованного ресурса пластичности Ψ, который определяли по формуле [4]:

$$\Psi = \int_0^{e_u} \frac{de_u}{e_p(\eta, \mu_\sigma)},$$

где $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ – поверхность граничных деформаций;

$\mu_\sigma = \frac{2\cdot\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ – параметр Лоде-Надаи.



а б

Рис. 2 – Картины напряженно-деформированного состояния процесса выдавливания: а – сопротивление деформированию, МПа, б – среднее напряжение, МПа

Для расчета использованного ресурса пластичности в конечно-элементной модели задавалось поле трассируемых точек (по высоте 20 точек, по толщине 50 точек). Рассматривалась кривые, построенные по трассируемым точкам, расположенным по контуру наружного фланца и по границе раздела течения металла. Графики распределения исходных параметров для расчета использованного ресурса пластичности и полученные значения (рис. 3) приведены в зависимости от номера трассируемой точки.

Моделирование процесса осуществлялось до полного исчерпания ресурса пластичности материала $\Psi = 1$. Поверхность граничных деформаций для АД31: $e_p(\eta, \mu_\sigma) = 1.1\cdot e^{(0{,}42\cdot\mu_\sigma - 0.51\cdot\eta)}$.

На рис. 3, а показано распределение интенсивности деформации в зависимости от трассируемой точки. Видно, что максимальное значение сосредоточено в точке максимально приближенной к поверхности верхней матрицы. Такие значения наблюдаются за счет притормаживания металла контактным трением. Напряжённое состояние (рис. 3, б) соответствует описанной деформации. Максимальная степень деформации также сосредоточена на контактных поверхностях фланца (рис. 3, в). В месте бочкообразования не происходит значительной проработки структуры, а деформация происходит за счет напряжений растяжения. По полученным зависимостям на рис. 3, г-ж можно сделать вывод о критической точке относительной возможности разрушения.

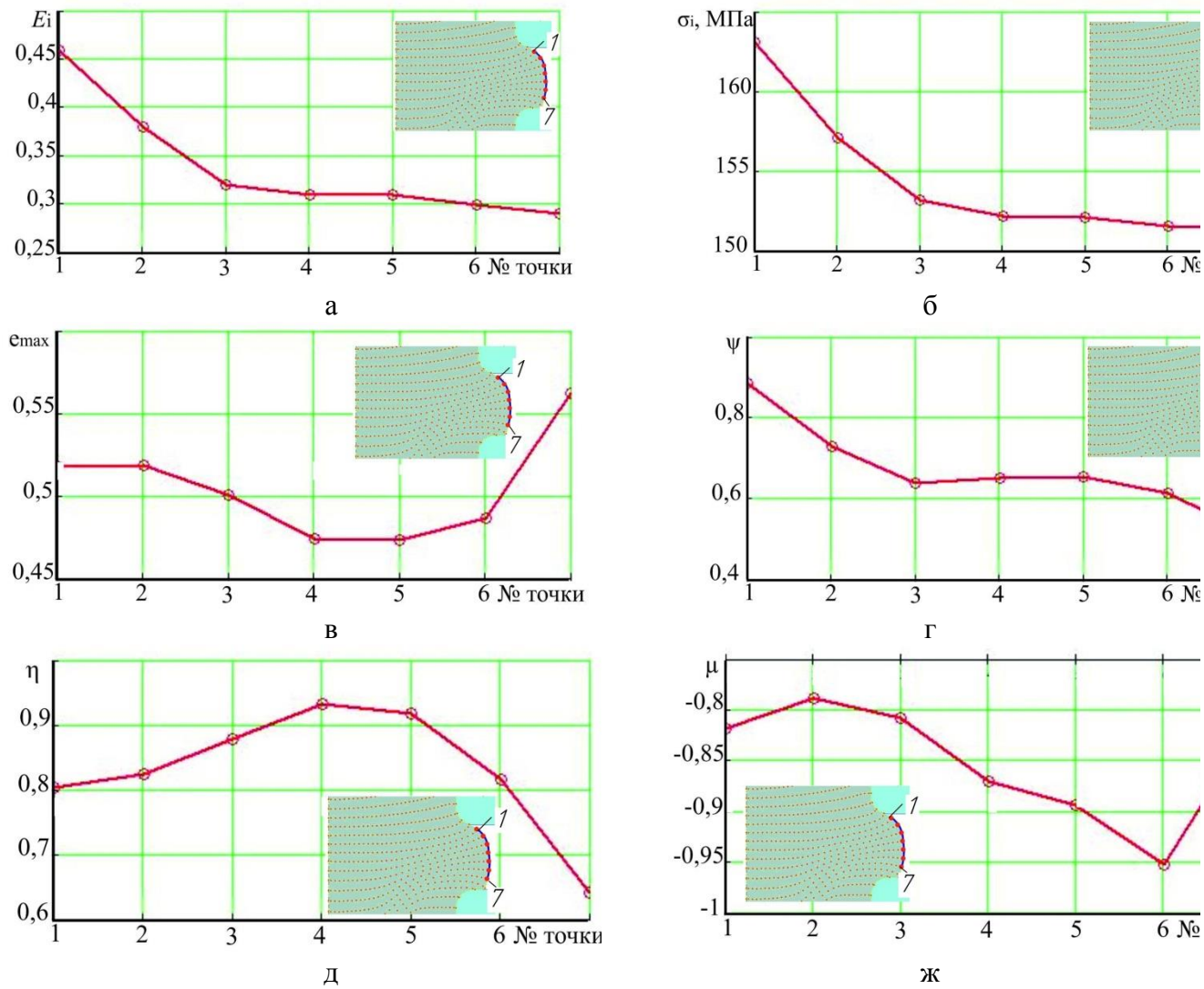


Рис. 3. – График распределения: а – интенсивности деформаций, б – сопротивления деформированию, в – максимальной логарифмической деформации, г – ресурса пластичности, д – показателя жесткости напряженного состояния и ж – показателя Лоде-Надаи в зависимости от положения трассируемой точки

Предварительный анализ получаемой детали показал, что наиболее вероятное место разрушения на поверхности наружного фланца соответствует точке 1 (рис. 3, г). Сопоставляя результаты моделирования и эксперимент, приходим к выводу, что более вероятной зоной разрушения является нижняя часть фланца. Дальнейшее моделирование проводилось до полного исчерпания ресурса. Как и предполагалось разрушение фланца происходит в зоне прилегающей к нижней матрице.

Согласно заявленным условиям, разрушения наступает при $\Psi = 1$. На графике видно, что при достижении критической степени деформации $e=0,75$ произойдет исчерпание ресурса пластичности, т.е. разрушение [5]. При проведении процесса комбинированного трёхстороннего выдавливания со

степенями критической деформации выше 0,75 будет происходить развитие трещин.

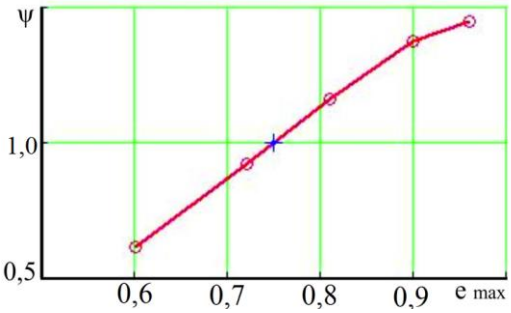


Рис. 4 – График распределения ресурса пластичности в зависимости от степени деформации в точки вероятного разрушения

Выводы. Проведено моделирование процесса комбинированного выдавливания детали методом конечных элементов при помощи программного продукта QForm 2D. Рассмотрены условия течения материала. Выяснено, что вероятным местом разрушения является торец наружного фланца. Получено значение критической степени деформации для данного процесса, которое составляет *e=0,75*.

Список литературы: 1. *Огородников В. А.* Параметры напряженного состояния диаграмм пластичности / *В. А. Огородников, Л. И. Алиева, И. А. Деревенько* // Обработка материалов давлением: сб. научн. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2011. – № 4 (29). – С. 10–18. **2.** *Алиева Л. И.* Ресурс пластичности в процессах комбинированного выдавливания / *Л. И. Алиева, И. А. Деревенько, Р. И. Сивак* // Обработка материалов давлением: сб. научн. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2013. – № 1 (34). – С. 11–17. **3.** *Сивак Р. И.* Влияние неравномерности пластической деформации на использованный ресурс пластичности / *Р. И. Сивак* // Обработка металлов давлением: сб. научн. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2012. – № 3 (32). – С. 40–44. **4.** *Алиева Л. И.* Теоретический анализ процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания деталей с фланцем / *Л. И. Алиева, Н. С. Грудкина* // Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. Серия 2. Технология машиностроения и материалы. – М.: МГТУ «МАМИ», 2013 – №2 (16), т. 2. – С. 163–172. **5.** *Сивак И. О.* Оценка пластичности металлов при холодной пластической деформации / *И. О. Сивак, Е. И. Сивак, С. И. Сухоруков* // Изв. Тул.ГУ. Серия: Механика твёрдого деформируемого тела и обработка металлов давлением. – Тула: Тул. ГУ, вып. 2. – 2004. – С. 114–121.

Bibliography (transliterated): 1. *Ogorodnikov V. A.* Parametryi napryazhennogo sostoyaniya diagramm plastichnosti *V. A. Ogorodnikov, L. I. Aliieva, I. A. Derevenko* Obrabotka materialov davleniem: sb. nauchn. trudov. – Kramatorsk: DGMA, 2011. – No 4 (29). – P. 10–18. **2.** *Aliieva L. I.* Resurs plastichnosti v protsessah kombinirovannogo vyidavlivaniya *L. I. Aliieva, I. A. Derevenko, R. I. Sivak* Obrabotka materialov davleniem: sb. nauchn. trudov. – Kramatorsk: DGMA, 2013. – No 1 (34). – P. 11–17. **3** *Sivak R. I.* Vliyanie neravnomernosti plasticheskoy deformatsii na ispolzovannyiy resurs plastichnosti *R. I. Sivak* Obrabotka metallov davleniem: sb. nauchn. trudov. – Kramatorsk: DGMA, 2012. – No 3 (32). – P. 40–44. **4.** *Aliieva L. I.* Teoreticheskiy analiz protsessa kombinirovannogo radialno-obratnogo vyidavlivaniya detaley s flantsem *L. I. Aliieva, N. P. Grudkina* Izvestiya MGTU «MAMI». Nauchnyiy retsenziruemyiy zhurnal. Seriya 2. Tehnologiya mashinostroeniya i materialyi. – Moscow: MGTU «MAMI», 2013 – No 2 (16), t. 2. – P. 163–172. **5.** *Sivak I. O.* Otsenka plastichnosti metallov pri holodnoy plasticheskoy deformatsii *I. O. Sivak, E. I. Sivak, P. I. Suhorukov* Izv. Tul.GU. Seriya: Mehanika tvYordogo deformiruemogo tela i obrabotka metallov davlenie Moscow – Tula: Tul. GU, vyip. 2, 2004. – P. 114–121.

Поступила (received) 28.10.2014

УДК 621.7.044

Р. Г. АРГАТ, ст. преподаватель, КрНУ;
Р. Г. ПУЗЫРЬ, канд. техн. наук, доц., КрНУ;
О. Н. ДОЛГИХ, студент, КрНУ, Кркменчуг

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВЫТЯЖНОМ РЕБРЕ МАТРИЦЫ ПРИ ВЫТЯЖКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

В статье приведены результаты теоретического анализа процесса вытяжки цилиндрических деталей из листового металла, учитывающие влияние технологических и геометрических параметров процесса на распределение опасных растягивающих напряжений на вытяжном ребре матрицы. Рассмотрено равновесие тороидальной оболочки без учета влияния касательных напряжений. Получена зависимость для расчета величины растягивающих напряжений на вытяжной кромке матрицы, которая позволяет учитывать влияние коэффициента вытяжки, угла охвата вытяжной кромки матрицы материалом заготовки, толщины последней и радиуса закругления матрицы.

Ключевые слова: вытяжка, листовая заготовка, деформация, пластичность, диаметр, радиус, равновесие.

Введение. Вытяжка цилиндрических заготовок из листового металла является достаточно распространенным процессом в практике листовой штамповки, т.к. большая часть изделий до 60–70% изготовляются именно им. Распространенность процесса вытяжки еще обуславливается достаточной степенью изученности явлений, происходящих в очаге деформации, большим количеством экспериментальной информации, а также множеством справочных рекомендаций, позволяющих учитывать все особенности способа и проектирования переходов, основываясь на них.

Анализ последних исследований и литературы. Теоретическому анализу процесса вытяжки цилиндрических деталей посвящены ряд работ [1, 2, 3, 4], в которых для определения напряженно-деформированного состояния решаются упрощенные уравнения равновесия совместно с условием пластичности по гипотезе максимальных касательных напряжений, что дает возможность авторам определить распределение напряжений на любом из участков заготовки аналитически, выявить технологические факторы данного способа, которые влияют на получение качественного полуфабриката. Развиваются методы конечно-элементного моделирования [5, 6] для определения компонента тензора напряжений и деформаций, что позволяет визуализировать результаты расчетов, и, основываясь на них вести построения рациональных вытяжных переходов.

Цель исследований, постановка проблемы. Целью работы является установление поля напряжений на вытяжном ребре матрицы при вытяжке цилиндрических деталей из листового металла без прижима фланца заготовки.

© Р. Г. Аргат, Р. Г. Пузырь, О. Н. Долгих. 2014

Материал и результаты исследований. Как показывают результаты ранее проведенных теоретических исследований [3, 4], вопросам распределения напряжений в материале заготовки на вытяжном ребре матрицы уделялось достаточно внимания. Однако приращение меридиональных напряжений учитывалось в основном за счет изгиба заготовки при переходе закругленной кромки полуфабриката в вытягиваемый стаканчик [4]:

$$\Delta\sigma_\rho = \frac{1}{4}\sigma_s \frac{s}{r_m + \frac{s}{2}}, \qquad (1)$$

где σ_s – предел текучести металла;

s – толщина заготовки;

r_m – радиус закругления кромки матрицы.

Как видно из приведенной зависимости приращение меридиональных напряжений зависит от механических и геометрических параметров заготовки, геометрии матрицы и будет уменьшаться с увеличением радиуса закругления входной кромки последней.

Достаточно точный анализ поля напряжений был выполнен по моментной теории оболочек [3], однако формальные зависимости оказались достаточно схожими и в силу этого не позволяют однозначно выявить характеристики процесса вытяжки, которые влияют на распределение меридиональных напряжений на вытяжной кромке матрицы.

Для определения поля напряжений в материале заготовки на вытяжном ребре матрицы исходили из безмоментной теории оболочек и гипотез Кирхгофа-Лява. Схематизацию очага деформации проводили путем отделения прямолинейных участков фланца и стенок от закругленной поверхности полуфабриката. Рассматривали уравнения равновесия для тора с осевой симметрией (см. рис. 1, 2).

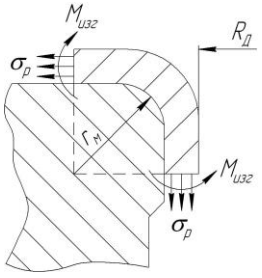


Рис. 1 – Участок заготовки на радиусе закругления матрицы

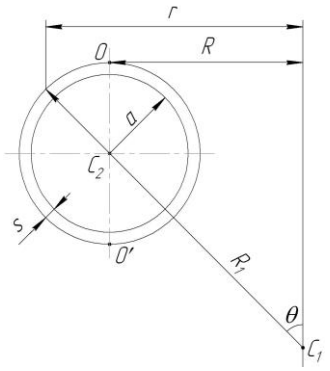


Рис. 2 – Поперечное сечение круговой тороидальной оболочки

Вводим криволинейные координаты θ и φ; под подразумевается полярный угол в плоскости меридиана; под φ – в плоскости параллельного круга; $a = r_m$; R – радиус вытягиваемого изделия. Все расчеты сводим к серединной поверхности заготовки. Уравнение равновесия в усилиях будет иметь вид [7]:

$$\left.\begin{array}{c} \dfrac{\partial R_2 N_1}{\partial \varphi} + \partial\left(\left(R_1 \sin\theta\right)T\right) - N_2 \dfrac{\partial R_2}{\partial \varphi} + T\dfrac{\partial R_1 \sin\theta}{\partial \theta} = 0 \\ \dfrac{\partial\left(\left(R_1 \sin\theta\right)N_2\right)}{\partial \theta} + R_2 \dfrac{\partial T}{\partial \varphi} - N_1 \dfrac{\partial\left(R_1 \sin\theta\right)}{\partial \theta} + T\dfrac{\partial R_2}{\partial \varphi} = 0 \\ \dfrac{N_1}{R_1} + \dfrac{N_2}{R_2} = 0 \end{array}\right\}, \quad (2)$$

где N_1, N_2, T – внутренние меридиальные, тангенциальные и сдвигающие напряжения.

Учитываем, что деформация осесимметричная, а значит, исчезают члены системы (2), содержащие $\partial\varphi$, а также сдвиговое усилие T, и что $R_1 = \dfrac{N}{\sin\theta} = \dfrac{a\left(1+h\sin\theta\right)}{k\sin\theta}$, $R_2 = a$, $k = \dfrac{a}{R}$, тогда будем иметь:

$$N_2 a\cos\theta + \frac{\partial N_2}{\partial \theta}\frac{a}{k}\left(1+k\sin\theta\right) - N_1 a\cos\theta = 0 \quad (3)$$

Для решения полученного уравнения используем уравнение пластичности по гипотезе максимальных касательных напряжений:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \sigma_s \quad (4)$$

где σ_ρ – максимальное растягивающее меридиальное напряжение;

σ_θ – минимальное главное нормальное тангенциальное напряжение;

σ_s – предел текучести материала.

Совместное решение уравнений с учетом того, что $\sigma = \frac{N}{s}$ дает дифференциальное уравнение:

$$d\sigma_\rho = \sigma_s \frac{k\cos\theta}{1+k\sin\varphi} d\theta, \tag{5}$$

где $N_1 = s\sigma_\rho$, $N_2 = s\sigma_\theta$.

Интегрирование уравнения (5) с использованием граничного условия $\theta = 0$ $\sigma_\rho = \sigma_s \, ln\frac{R_з}{R_Д + s + r_m}$ (на границе зон фланца и начала образования тороидального участка) позволяет получить формулу для определения величины σ_ρ в функции угла θ охвата металлом кромки матрицы

$$\sigma_\rho = \sigma_s \left(ln\frac{R_з}{R_Д + s + r_m} + \frac{\frac{r_m}{R_Д + s + r_m}\sin\theta}{1 + \frac{r_m}{R_Д + s + r_m}\sin\theta} \right), \tag{6}$$

где $R_з$ – радиус заготовки;

$R_Д$ – радиус вытягиваемой детали;

s – толщина заготовки;

r_m – радиус входной кромки матрицы (рис. 1).

Так как заготовка деформируется осесимметрично, то слагаемое, содержащее $\sin\varphi$ можно опустить, тогда формула (6) упрощается:

$$\sigma_\rho = \sigma_s \left(\ln\frac{R_з}{R_Д + s + r_m} + \frac{r_m}{R_Д + s + r_m}\sin\theta \right). \tag{7}$$

Из уравнения пластичности находим формулу для определения величины тангенциальных напряжений σ_θ в функции угла охвата θ

$$\sigma_\theta = -\sigma_s \left(1 - \ln\frac{R_з}{R_Д + s + r_m} - \frac{r_m}{R_Д + s + r_m}\sin\theta \right). \tag{8}$$

В том случае, когда угол охвата заготовкой скругленной кромки матрицы достигает значения $\theta = \frac{\pi}{2}$, $\sin\theta = 1$, меридиональные напряжения будут иметь максимальное значение

$$\sigma_\rho = \sigma_s \left(\ln \frac{R_з}{R_Д + s + r_m} + \frac{r_m}{R_Д + s + r_m} \right). \quad (9)$$

Сравним результаты полученного решения с результатами исследований Попова Е.А. [4].

При переходе фланцевой части заготовки на скругленную кромку матрицы меридиальные напряжения увеличиваются скачкообразно на величину $\Delta\sigma_\rho$, которая учитывает приращение напряжений в зависимости от изгиба и спрямления на входе в отверстие матрицы [4] и их максимальная величина будет выражаться зависимостью

$$\Delta\sigma_\rho = \frac{s}{2r_m + s}\sigma_s, \quad (10)$$

Для заготовки с R = 50 мм, s = 2 мм, $R_Д$ = 25 мм и r_m = 10 мм по зависимости (10) $\Delta\sigma_\rho = 0{,}09\sigma_s$, а по формуле (9) $\Delta\sigma_\rho = 0{,}27\sigma_s$, т.е. в три раза больше.

Выводы. Как показали теоретические исследования процесса вытяжки цилиндрических деталей, меридиональные растягивающие напряжения при подходе к кромке матрицы не увеличиваются скачкообразно, а плавно возрастают от значения $\sigma_s ln\frac{R_з}{R_Д + s + r_m}$ до значения $\sigma_s \left(ln\frac{R_з}{R_Д + s + r_m} + \frac{r_m}{R_Д + s + r_m} \right)$ и изменяются на вытяжном ребре по закону синуса. Причем их максимальное значение уменьшается с увеличением диаметра вытягиваемого стаканчика, что соответствует увеличению коэффициента вытяжки $m = R_Д / R_з$ – уменьшению степени деформации. С ростом величины радиуса закругления входной кромки матрицы, максимальные растягивающие напряжения увеличиваются, но с меньшей интенсивностью, чем при уменьшении диаметра изделия. Полученная зависимость более точно раскрывает сущность влияния параметров вытяжки на величину опасных напряжений и может использоваться в технологических расчетах.

Список литературы: 1. *Шофман Л. А.* Теория и расчеты процессов холодной штамповки. – М.: Машиностроение, 1964. – 375 с. **2.** *Аверкиев Ю. А., Аверкиев А. Ю.* Технология холодной штамповки. – Москва: Машиностроение, 1989. **3.** *Казакевич И. И.* Расчет процессов осесимметричного деформирования осесимметричных оболочек / И.И. Казакевич // В. кн.: Машины и технология обработки металлов давлением. М.: Машгиз, 1960. – № 98 с. – С. 174–202. **4.** *Попов Е. А.* Основы теории листовой штамповки / *Е. А. Попов.* – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с. **5.** *Калюжний О. В.* Визначення максимального зусилля деформування та потовщення фланця при витягуванні з диференційованим радіальним підпором фланця / *О. В. Калюжний* // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 38–44. **6.** *Калюжний В. Л.* Інтенсифікація технологій виготовлення виробу «Балон 180х184» /

В. Л. Калюжний, А. С. Запорожченко, В. В. Піманов // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2012. – № 2 (31). – С. 136–140. **7.** *Вольмир А. С.* Устойчивость деформируемых систем / *А. С. Вольмир.* – М.: Наука, 1967. – 984 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Shofman L. A.* Theory and calculations of processes of the cold stamping. – Moscow: Engineer, 1964. – 375 p. **2.** *Averkiev Y.A., Averkiev A. Y.* Technology of the cold stamping. – Moscow: Engineer, 1989. **3.** *Kazakevich I. I.* Calculation of processes of axisymmetrical deformation of axisymmetrical shells / of I. I. Kazakevich // Higher book: Machines and technology of treatment of metals of pressure. – Moscow: Mashgiz, 1960. – No 98 p. – P. 174–202. **4.** *Popov E. A.* Bases of theory of the sheet stamping / of E. A. Popov. – Moscow: Engineer, 1977. – 278 p. **5.** *Kalyughniyi V. L.* Determination of maximal effort of deformation and bulge of flange at drawing out with differentiated radial skid of flange / V. L. Kalyughniyi // Treatment of materials pressure: collection of scientific labour. – Kramatorsk: DGMA, 2012. – No 1 (30). – P. 38–44. **6.** *Kalyughniyi V. L.* Intensification of technologies of making of good is «Bulb 180x184» / V. L. Kalyughniyi, A. P. Zaporozchenko, V. V. Pimanov // Treatment of materials pressure: collection of scientific labour P. – Kramatorsk: DSMA,, 2012. – No 2 (31). – P. 136–140. **7.** *Volmir A. P.* Stability of the deformed systems / A. P. Volmir. – Moscow: Science, 1967. – 984 p.

Поступила (received) 25.10.2014

УДК 621.923

Т. М. БРИЖАН, ГВУЗ ”ПГТУ”, Мариуполь;
С. А. ДИТИНЕНКО, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков[3]

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

Аналитически определены параметры срезов при обработке отверстий развертками с наклонными зубьями и условия безвибрационной обработки. Доказана возможность существенного увеличения фактического переднего угла зуба развертки за счет увеличения его угла наклона, что способствует снижению силовой напряженности процесса резания, в особенности радиальной составляющей силы резания, которая при съеме неравномерного припуска определяет интенсивность колебаний в технологической системе, а соответственно точность обработки отверстия.

Ключевые слова: развертывание отверстия, безвибрационная обработка, интенсивность колебаний, технологическая система, обрабатываемый материал, толщина среза.

Введение. При съеме неравномерных припусков на операциях развертывания отверстий в технологической системе возникают интенсивные колебания, которые не позволяют обеспечить высокие показатели точности обработки отверстий. Как известно, одним из эффективных методов снижения интенсивности колебаний при обработке отверстия является расположение зубьев развертки под наклоном. В этом случае обеспечивается переход от ударного к более плавному характеру взаимодействия зубьев развертки с обрабатываемым материалом, что повышает точность обработки. Поэтому определение условий эффективного применения данного метода обработки является актуальной задачей технологии машиностроения.

© Т. М. Брижан, С. А. Дитиненко, 2014

Анализ последних достижений и литературы. В работах [1, 2] показаны закономерности формирования погрешностей обработки при развертывании отверстий. В работе [3] приведены результаты исследований колебательных процессов при развертывании отверстий. Однако при этом не раскрыты кинематические закономерности обработки отверстий развертками с наклонными зубьями, которые предопределяют условия возникновения и устранения колебаний, а также снижения погрешностей обработки и повышения точности обрабатываемых отверстий.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является определение путей повышения точности обработки отверстий развертками с наклонными зубьями на основе аналитического описания параметров срезов.

Материалы исследования. Экспериментально установлено, что создание наклонных зубьев развертки принципиально изменяет характер процесса съема материала, позволяет перераспределить значения составляющих силы резания в пользу снижения радиальной P_y составляющей силы резания, определяющей погрешности обработки отверстия [4, 5]. Как известно, выполнение условия $P_y \to 0$ приводит к повышению точности обработки отверстия. Эффект обработки в данном случае достигается за счет того, что создание наклонных зубьев развертки позволяет увеличить рабочую длину зуба, т.е. увеличить ширину среза *b* и соответственно уменьшить толщину среза *a*. Ширина среза *b* определяется зависимостью (рис. 1):

$$b = \frac{l}{\cos\omega}, \qquad (1)$$

где l – длина заборной части развертки, м;

ω – угол наклона зубьев развертки.

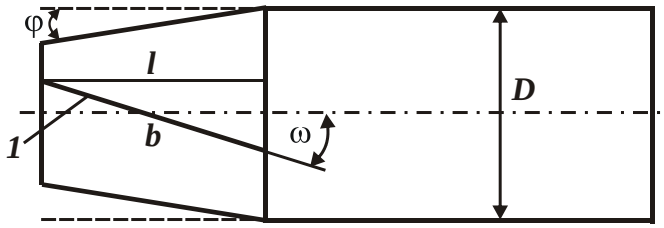


Рис. 1 – Расчетная схема параметров заборной части развертки: 1 – зуб развертки

Соответственно толщина среза *a* определяется из условия постоянства площади поперечного сечения среза одним зубом развертки $F = a \cdot b = S_z \cdot t$, где S_z – подача на зуб развертки, м/зуб; t – глубина резания, м. Тогда

$$a = \frac{S_z \cdot t}{l} \cdot \cos\omega . \qquad (2)$$

Из приведенных зависимостей (1) и (2) вытекает, что с увеличением угла наклона зубьев развертки ω ширина среза b увеличивается, а толщина среза a, наоборот, уменьшается. Очевидно, это приведет к снижению износа зубьев развертки и повышению ее стойкости. При обработке осевым инструментом с одним режущим зубом условие $P_y \to 0$ не выполняется. Однако, располагая режущий зуб развертки под наклоном, можно обеспечить его непрерывный контакт с обрабатываемым материалом и реализовать условие $P_y \to 0$. В этом случае будет осуществляться плавный безударный характер контакта зуба развертки с обрабатываемым материалом, что важно при съеме неравномерного припуска с целью выполнения условия $P_y \to 0$ и повышения точности обработки отверстия.

Исходя из рис. 2, при обработке отверстия разверткой с одним зубом, условие $P_y = 0$ будет выполняться при угле ω, определяемом зависимостью:

$$\mathrm{tg}\omega = \frac{\pi \cdot D}{l}, \qquad (3)$$

где D – диаметр развертки, мм.

Для исходных данных: D=20 мм; l=20 мм угол ω=72^0.

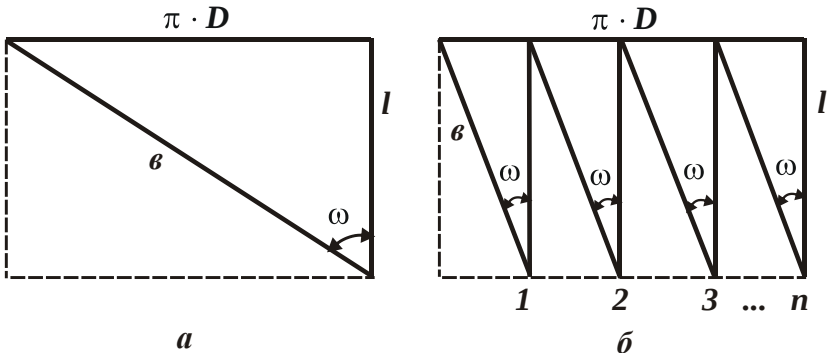


Рис. 2 – Схема рабочей поверхности развертки: а – с одним и с б – n зубьями, расположенными под углом наклона ω

Рассматривая развертку с n зубьями, зависимость (3) примет вид:

$$\mathrm{tg}\omega = \frac{\pi \cdot D}{n \cdot l}. \qquad (4)$$

Результаты исследований. В табл. 1 и на рис. 3 приведены расчетные значения угла наклона зубьев развертки ω, обеспечивающие непрерывный

контакт с обрабатываемым материалом в зависимости от количества зубьев развертки n.

Таблица 1. Расчетные значения угла наклона зубьев развертки ω

n	1	2	4	6	8	10
ω, град.	72	58	38	28	22	18

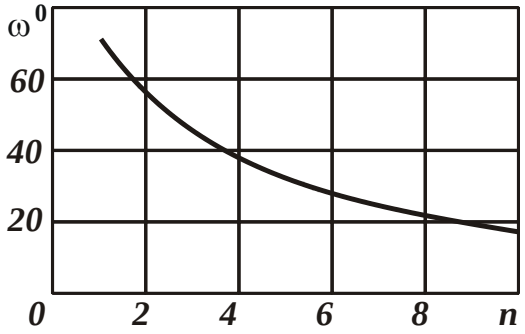


Рис. 3 – Зависимость угла наклона зубьев развертки ω от количества зубьев развертки n

С увеличением количества зубьев развертки n от 1 до 10 угол наклона зубьев развертки ω уменьшается от 72^0 до 18^0. Реализация этих значений угла ω позволит осуществлять плавный переход поочередной работы зубьев. При превышении этих значений плавность работы зубьев улучшится, что будет способствовать повышению устойчивости процесса развертывания и точности обработки отверстия.

Следует учитывать также тот факт, что расположение зубьев развертки под углом наклона ω приводит к увеличению переднего угла зуба γ. Для его определения необходимо рассмотреть расчетную схему (рис. 4), в которой передняя поверхность зуба (плоскость ОВС) пересекаются двумя плоскостями: ОАВ и ОАС. Угол между ними равен ω_1, который, по сути, определяет угол схода стружки и устанавливается зависимостью $tg\omega_1 = (0{,}2...0{,}4)\cdot tg\omega$ [1]. Углы $\angle OAB$ и $\angle OAC$ равны 90^0.

Прямая ОА образует угол γ (равный исходному переднему углу зуба развертки) с прямой линией ОВ. Фактический (искомый) передний угол зуба развертки γ_1 образуется между прямыми ОА и ОС, т.е. $\cos\gamma_1 = \dfrac{OA}{OC}$.

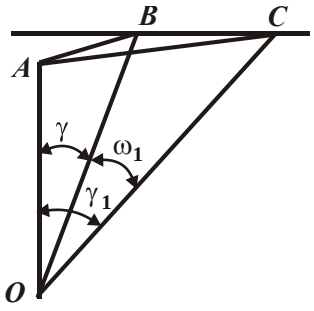


Рис. 4 – Расчетная схема фактического переднего угла зуба развертки γ_1

С учетом того, что угол $\angle ABC = 90^\circ$, имеем: $OC = \frac{OB}{\cos\omega_1}$; $OB = \frac{OA}{\cos\gamma}$. Тогда после несложных преобразований получено

$$\cos\gamma_1 = \cos\gamma \cdot \cos\omega_1. \qquad (5)$$

Новый (фактический) передний угол зуба развертки γ_1 связан с исходным передним углом зуба развертки γ и углом ω_1 тригонометрическими функциями. В табл. 2 приведены значения угла ω, рассчитанные по зависимости $\mathrm{tg}\omega_1 = 0{,}4 \cdot \mathrm{tg}\omega$.

Таблица 2. Расчетные значения угла ω (в градусах)

ω_1°	0	10	20	30	40	50
ω°	0	24	42	55	64	72

Из табл. 2 и рис. 5 следует, что угол γ_1 существенно увеличивается с увеличением угла ω_1 и соответственно угла ω. Исходный передний угол зуба развертки γ в значительно меньшей степени влияет на угол γ_1 по сравнению с углом ω_1, в особенности при $\omega_1 > 30^\circ$. Поэтому при $\omega_1 > 30^\circ$ с достаточной для практики точностью расчет фактического переднего угла зуба развертки γ_1 можно производить по упрощенной зависимости $\gamma_1 \approx \omega_1$.

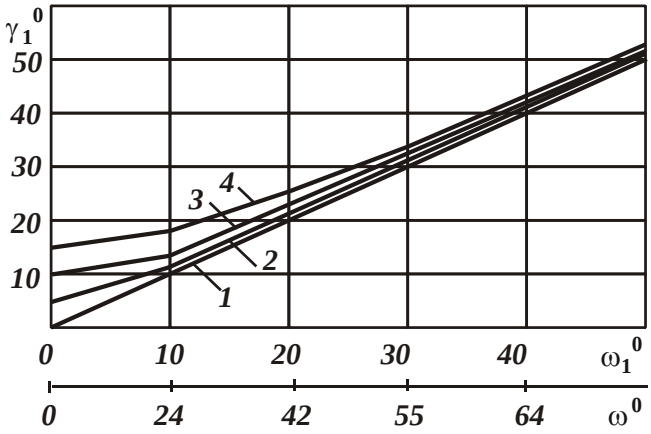


Рис. 5. Зависимость угла γ_1 от угла ω_1 (угла ω): 1 – $\gamma = 0^{\circ}$; 2 – $\gamma = 5^{\circ}$; 3 – $\gamma = 10^{\circ}$; 4 – $\gamma = 15^{\circ}$

В этом случае фактический передний угол зуба развертки γ_1 приблизительно равен углу ω_1. Так, увеличивая угол ω_1 до значений $\omega_1 \geq 45^{o}$, можно в несколько раз увеличить фактический передний угол зуба развертки γ_1 и тем самым снизить силовую напряженность процесса резания, в особенности радиальную составляющую силы резания, которая в условиях съема неравномерного припуска определяет величины упругих перемещений, возникающих в технологической системе, и интенсивность колебаний, а соответственно точность обработки отверстия.

Выводы. В работе аналитически определены параметры срезов при обработке отверстий развертками с наклонными зубьями и условия безударной обработки, основанные на соблюдении определенных соотношений между углом наклона зубьев развертки, их длиной и количеством. Доказана возможность существенного увеличения фактического переднего угла зуба развертки за счет увеличения его угла наклона, что способствует снижению силовой напряженности процесса резания, в особенности радиальной составляющей силы резания, которая в условиях съема неравномерного припуска определяет величины упругих перемещений в системе и интенсивность колебаний, а соответственно точность обработки отверстия.

Список литературы: 1. *Бобров В.Ф.* Основы теории резания металлов / *В.Ф. Бобров*. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с. **2.** *Грановский Г.И*. Резание металлов: учебник / *Г.И. Грановский, В.Г. Грановский*. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с. **3.** Пуховский Е.С. Безвибрационное многолезвийное резание / Е.С. Пуховский, Г.Э. Таурит, М.И. Лещенко. – К.: Техніка, 1982. – 117 с. **4.** Брижан Т.М. Повышение качества обработки глубоких отверстий при развертывании / Т.М. Брижан // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы научн.-техн. конф., Одесса. – Киев: АТМ Украины, 2014. – С. 20–23. **5.** Брижан Т.М. Повышение точности обработки глубоких отверстий / Т.М. Брижан // Современные инновации в науке и технике: сборник научных трудов 4-ой Междунар. научн.-практ. конф. В 4-х т. Том 1. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – С. 159–166.

Bibliography (transliterated): 1. *Bobrov V.F.* Osnovy teorii rezaniya metallov *V.F. Bobrov*. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 343 P. **2.** *Granovskiy G.I.* Rezanie metalov: uchebnik *G.I. Granovskiy,*

B.G. Granovskiy. – Moscow: Vysshaya shkola, 1985. – 304 P. **3.** Pukhovskiy E. P. Bezvibratsionnoe mnogolezviynoe rezanie E. P. Pukhovskiy, G.E. Taurit, M.I. Leshenko. – Kiev: Tekhnika, 1982. – 117 P. **4.** Brizhan T.M. Povyshenie kachestva obrabotki glubokikh otverstiy pri razvertyvanii T.M. Brizhan Novye i netraditsionnye tekhnologii v resurso- i energosberezhenii: materialy nauchn.-tekhn. konf., Odessa–Kiev: ATM Ukrainy, 2014. – P. 20–23. **5.** Brizhan T.M. Povyshenie tochnosti obrabotki glubokikh otverstiy T.M. Brizhan Sovremennye innovatsii v nauke i tekhnike: sbornik nauchnykh trudov 4-oy Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. V 4-kh t. Tom 1. – Kursk: Yugo-Zap. gos. un-t, 2014. – P. 159–166.

Поступила (received) 23.10.2014 р.

УДК 621.73

В. О. ЄВСТРАТОВ, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

ФОРМУВАННЯ МОРФОЛОГІЧНОГО ЯЩИКА ЯК ПЕРЕДУМОВА ПОШУКУ НОВИХ ВИДІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ МЕТАЛІВ ТИСКОМ

Запропоновано новий підхід до класифікації обладнання для оброблення металів тиском. Особливість підходу – створення морфологічного ящика (таблиці) з 11-ма осями. У таблиці наведено 8 конструкторських класифікаційних ознак та 3 технологічні. Таблиця містить усі уявні варіанти конструкцій обладнання та їхнього технологічного застосування, які охоплені класифікаційними ознаками, що прийняті для класифікації. Запропоновано нові терміни та дані їхні тлумачення: заготованка, покованка, штампованка, корба. Така детальна класифікація може стати основою для генерування нових конструкцій обладнання з використанням сучасних ІТ- технологій.

Ключові слова: морфологічний ящик, класифікаційна ознака, заготованка, покованка, штампованка, корба, колінчастий вал, ексцентриковий вал, кривошипний вал, кратність дії.

Вступ. Відомо багато підходів до класифікації обладнання для оброблення металів тиском (ОМТ). Але кожен з них має певні недоліки. Найсуттєвіший з них – намагання розробити класифікацію лише існуючих видів обладнання, не визначивши їхні основні спільні класифікаційні ознаки, не створивши передумов для генерування нових видів ковальсько-штампувального обладнання (КШО).

Аналіз сучасного стану проблеми. У роботі [1] обладнання поділено лише на три групи: 1) молоти; 2) гідравлічні преси; 3) кривошипні та ротаційні машини. У роботі [2] усе КШО поділено на чотири групи: 1) молоти; 2) кривошипні преси; 3) гідравлічні преси; 4) ротаційні машини. У роботі [3] тільки частину КШО – обладнання для гарячого штампування – поділено на п’ять груп: 1) штампувальні молоти; 2) гвинтові прес-молоти; 3) кривошипні машини; 4) гідравлічні преси; 5) нові ковальсько-пресові машини. У роботі [4] зазначено: «За роки науково-технічної революції створено нові машини. Це веде до безперервного збагачення та удосконалення класифікації, яка має охоплювати усі нові типи машин та ставати основою вивчення та

4

удосконалювання відповідного обладнання і планування його запровадження у промисловість». На цій підставі виділено п’ять основних класів КШО: 1) преси; 2) молоти; 3) ротаційні машини; 4) імпульсні машини; 5) стати (газостати та гідростати). Автори слушно зауважують, що до цієї класифікації не включено деякі машини через їхнє незначне використання у виробництві.

Актуальність дослідження. Аналізуючи згадані класифікації треба зауважити, що вони містять внутрішні протиріччя, наприклад, з того, що в останній класифікації молоти відокремлені від імпульсних машин, хоча за принципом дії їх слід об’єднати в одну класифікаційну групу; стати відокремлені від пресів, хоча й ці види обладнання за принципом їхньої дії слід віднести до однієї класифікаційної групи. Різні автори використовують для класифікації лише невелику кількість класифікаційних ознак. Тому класифікації [1–4] неповні. *Вони йдуть за розвитком обладнання, а не прогнозують можливості створення нових його конструкцій.*

Мета і задачі дослідження. Автор пропонує підхід, в основу якого покладено морфологічний ящик (морфологічну таблицю) [5]. Це дозволяє, з одного боку, чітко визначити основні спільні класифікаційні ознаки, з другого – уніфікувати назви машин, поставивши цю справу на науковий рівень, а з третього (і це головне!) *використовувати сучасні інформаційні технології для генерування нових, ще не відомих виробництву конструкцій КШО, хоча синтез нових ефективних технічних рішень в цьому випадку є досить складною проблемою вибору доцільних рішень з дуже великої кількості можливих* (10 206 000)*, що зазначені у ящику*.

Результати дослідження. У таблиці наведено 8 конструкторських класифікаційних ознак та 3 ознаки технологічні. Тому таблиця містить дуже багато формально можливих варіантів різноманітних технічних рішень. Деякі з них є принципово неможливими. Наприклад, статичний принцип дії несумісний із безшаботним способом замикання сили деформації. Але у таблиці містяться і перспективні (ще невідомі!) конструкції обладнання для ОМТ.

Таблиця потребує деяких коментарів щодо термінології.

По-перше. Зараз в українських ДСТУ з термінології набув поширення такий неоковирний термін – штампована поковка. Що це таке? Є в технології оброблення металів тиском два розповсюджених способи виробництва деталей – кування і штампування. Тому й вироби, які кують треба називати покованками, а вироби, які штампують – штампованками. Разом із заготованкою (а на заготівкою!) ці три базові терміни утворюють тріаду термінів, яки узгоджені між собою як за смислом, так і граматично.

Таблиця Основні класифікаційні ознаки обладнання та варіанти їхньої реалізації

Принцип дії	1. Динамічний 2. Статичний 3. Динаміко-статичний 4. Статико-динамічний 5. Ротаційний
Режим дії	1. Звичайний 2. Напівавтоматичний 3. Автоматичний 4. Із числовим програмним керуванням (ЧПК)
Джерело енергії	1. Водяна пара 2. Стиснене повітря або газ 3. Рідина високого тиску 4. Електрична енергія 5. Хімічна енергія
Вид головного виконавчого механізму	1.Пневмоциліндр 2. Гідроциліндр 3. Корбово-поковзневий механізм 4. Корбово-колінчастий механізм 5. Корбово-важільний (складний) 6. Кулачковий 7. Гвинтовий 8. Рейковий 9. Електромагнітний
Кратність дії	1. Простої дії 2. Подвійної дії 3. Потрійної дії 4. Групової дії
Напрям сили деформації	1. Вертикальний 2. Горизонтальний 3. Похилий 4. Комбінований
Спосіб замикання сили	1. Рамний 2. Колонний 3. Шаботний 4. Безшаботний
Кількість робочих позицій	1. Одна 2. Дві 3. Три 4. Чотири 5. Багато
Вид деформації	1. Гаряча 2. Напівгаряча (тепла) 3. Холодна
Вид заготованки	1. Зливок або виливок 2. Вальцювання сортове 3. Вальцювання листове (в т.ч. стрічка) 4. Покованка 5. Штампованка 6. Штампованка (листова) 7. Порошок
Технологічне призначення обладнання	1. Розділення 2. Кування 3. Штампування (об’ємне) 4. Штампування (листове) 5. Видавлювання 6. Пресування 7. Компактування 8. Калібрування 9. Карбування

По-друге. В конструкціях пресів широко використовують колінчасті вали, ексцентрикові, кривошипні, але як узагальнююче поняття для цих видів валів в російській термінології використовують термін – кривошипні вали. Це суттєва неточність. В українській мові є поняття корба. Воно є узагальнюючим (як, наприклад, меблі по відношенню до стола, стільця, шафи тощо). Тому під корбовим пресом розумітимемо будь-який прес, у якого головний виконавчий механізм має або колінчастий, або ексцентриковий, або кривошипний вал.

Перша класифікаційна ознака – *принцип дії.* Відповідно до неї усе КШО можна поділити на п’ять видів.

До першого виду можна віднести обладнання з *динамічним принципом дії*. Він полягає в тому, що формозмінення заготованки здійснюється за рахунок кінетичної, електричної чи хімічної енергії, *накопиченої до моменту деформації*. Тут можна виділити молоти (кувальні та штампувальні), устаткування для вибухового, а також електрогідравлічного та магнітно-імпульсного штампування.

Відповідно до конструктивних особливостей (*структури*) можна виділити такі різновиди обладнання.

МОЛОТ – вид обладнання для ОМТ, який складається із замкненої або незамкненої рами, всередині якої переміщується баба, що рухається паровим (повітряним) циліндром, керованим паровим (повітряним) розподільником, котра за допомогою інструмента (бойків або штампів) деформує заготованку.

Для штампування іноді використовують молоти із зустрічним рухом двох баб (безшаботні молоти).

В остання роки все більшого розповсюдження набувають високошвидкісні штампувальні молоти.

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИБУХОВОГО ШТАМПУВАННЯ – вид обладнання для ОМТ, яке містить басейн, де розташовується рідина, заготованка, формотворний інструмент, запальник та заряд вибухової речовини (ВР), при надшвидкому згорянні якої в рідині утворюється вибухова хвиля, котра деформує заготованку.

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИБУХОВОГО ГАЗОВОГО ШТАМПУВАННЯ – вид обладнання для ОМТ, складений з циліндра для детонаційного згоряння газової суміші, місця для заго-тованки, формотворного інструмента, передавального середовища (яке може бути рідиною або твердим тілом), котре деформує заготованку.

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО ШТАМПУВАННЯ – вид обладнання для ОМТ, складений із замкненої рами або колонної конструкції, спеціального пристрою для розрядника, порожнини для рідкого передавального середовища, формотворного інструмента та заготованки,

гідравлічного пристрою для замикання, конденсаторної батареї для накопичення електричної енергії, а також пристрою для комутації конденсаторів із розрядниками (найчастіше кількома, зібраними у групи), які створюють в рідині електрогідравлічний удар, котрий деформує заготовку.

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО ШТАМПУВАННЯ – вид обладнання для ОМТ, складений з рами, конденсаторної батареї для накопичення електричної енергії, пристрою для комутації конденсаторів із формотворним інструментом, що має форму просторової або плоскої котушки, яка створює надпотужне імпульсне електромагнітне поле, котре деформує заготовку.

До другого виду можна віднести обладнання, зі *статичним принципом дії*. Він полягає в тому, що пластичне формозмінення заготованки здійснюється за рахунок потенційної енергії, яка віддається джерелом енергії безпосередньо у процесі робочого ходу обладнання.

Відповідно до принципу дії цих видів обладнання та їхніх конструктивних особливостей (*структури*) можна виділити такі різновиди обладнання.

ПРЕС ГІДРАВЛІЧНИЙ – вид обладнання для ОМТ, складений із замкненої рами або колонної конструкції, по напрямним якої переміщується поковзень (або поперечка), на яку діє один чи кілька гідравлічних циліндрів, які живляться від насоса, мультиплікатора або насосно-акумуляторної станції через хлипаковий (клапанний) або суваковий (золотниковий) гідророзподільник.

ГІДРОСТАТ – вид обладнання для ОМТ, складений з міцного контейнера (переважно циліндричної форми), в якому передбачене місце для порошкового матеріалу в оболонці, спеціальне вікно для завантаження-вивантаження, та з гідравлічного насоса високого тиску, який через систему керування з’єднано з контейнером.

ГАЗОСТАТ – вид обладнання для ОМТ, складений з міцного контейнера, в якому передбачене місце для порошкового матеріалу в оболонці, спеціальне вікно для завантаження-вивантаження, та з повітряного компресора високого тиску, який через систему керування з’єднано з контейнером.

До третього виду можна віднести обладнання з *динаміко-статичним принципом дії*. Він полягає в тому, що формозмінення заготовки здійснюється частково за рахунок кінетичної енергії, накопиченої рухомими частинами (зокрема, крутнем) до моменту деформації, а частково за рахунок енергії, віддаваної джерелом енергії (переважно електричним двигуном) безпосередньо у процесі деформації.

Відповідно до принципу дії цих видів обладнання та їхніх конструктивних особливостей (*структури*) можна виділити такі різновиди обладнання.

ПРЕС МЕХАНІЧНИЙ – вид обладнання для ОМТ, складений із замкненої рами-станини, напрямними якої перпендикулярно до столу переміщується деформувальна частина преса (поковзень), яка рухається електродвигуном та крутнем через систему передач (клинопасових, зубчастих, корбово-поковзневих, кулачкових тощо).

Існує велика кількість різноманітних за конструкцією видів механічних пресів, які відрізняються варіантами реалізації класифікаційних ознак, які наведені у таблиці. Прес механічний може бути вертикальним, похилим чи горизонтальним. Зазначимо, що горизонтальні преси виробничники неправильно називають горизонтально-кувальною машиною (ГКМ). Цей прес не кує заготованку, а штампує її. Тому правильно його називати горизонтальним штампувальним пресом (ГШП).

ВАЛЬЦЮВАЛЬНИЙ ВЕРСТАТ – вид обладнання для ОМТ, складений з рами-станини, напрямними якою паралельно до столу переміщується поковзень, що за допомогою двох клиноподібних пласких інструментів, встановлених на поковзні та столі верстата, формує циліндричні заготованки, утворюючи з них тіла обертання зі змінними за довжиною діаметрами. У цьому верстаті також обов’язково є крутень.

Як різновид цього обладнання широко відомі так звані накатувальні верстати, на яких за допомогою пласких плашок накочується різь на болтах, гвинтах, шпильках.

До четвертого виду можна віднести обладнання зі *статико-динамічним принципом дії*. Він полягає в тому, що формозмінення заготованки здійснюється у два етапи: спочатку за рахунок енергії, яка віддається крутнем у процесі деформації, а остаточне формозмінення здійснюється за рахунок кінетичної енергії, накопиченої рухомими частинами до моменту деформації.

Четвертий вид обладнання характеризується значним різноманіттям конструктивних особливостей (*структури*), але усе воно має однакову назву – прес-молот.

ПРЕС-МОЛОТ – вид обладнання для ОМТ, що представляє комплекс із гідравлічного преса, який здійснює попереднє формозмінення заготованки шляхом її статичного навантаження, та молота, який здійснює остаточне формозмінення заготованки шляхом її динамічного навантаження.

До п'ятого виду можна віднести обладнання з *ротаційним принципом дії*. Він полягає в тому, що формозмінення заготованки здійснюється за рахунок обертання або інструмента, або інструмента і заготованки разом.

Відповідно до принципу дії цих видів обладнання та їхніх конструктивних особливостей (*структури*) можна виділити таке обладнання для ОМТ.

ВАЛЬЦІ – вид обладнання для підготовчих операцій штампування, складений з рами-станини, в якій у вальницях розташовано два (або чотири) вали, на яких встановлено секторний інструмент, що обертається через систему передач (клинопасових, зубчастих тощо) електродвигуном і в процесі прямолінійного поздовжнього руху заготованки надає їй потрібну форму (відповідно до кресленика епюри діаметрів).

ДИСКОВІ НОЖИЦІ – вид обладнання для розділових операцій ОМТ, складений з рами-станини, в якій у вальницях розташовано два вали, на яких встановлено дисковий інструмент, що обертається через систему передач (клинопасових, зубчастих тощо) електродвигуном і в процесі прямолінійного поздовжнього руху листа або стрічки розділяє заготованку на кілька вужчих смуг або стрічок.

ВАЛЬЦЮВАЛЬНИЙ (ПРОКАТНИЙ) СТАН – вид обладнання для підготовчих операцій ОМТ, складений з рами-станини, в якій у вальницях установлено два або три вали, на яких розташовано циліндричний або конічний інструмент із рівчаками, що обертається через систему передач (клинопасових, зубчастих тощо) електродвигуном і в процесі прямолінійного або гвинтоподібного руху циліндричної заготованки формує її у відповідності з жаданою технологом формою.

РОЗКОЧУВАЛЬНИЙ СТАН – вид обладнання для ОМТ, складений з рами-станини, в якій у вальницях обертаються два вали, на яких установлено циліндричний інструмент із рівчаками, що обертається через систему передач (клинопасових, зубчастих тощо) електродвигуном і в процесі обертового руху кільцевої заготовки формує її поперечний переріз у відповідності з жаданою технологом формою.

РОТАЦІЙНО-КУВАЛЬНА МАШИНА – вид обладнання для ОМТ, складений із замкненої рами, в якій розміщений деформуючий орган машини – бойки, які за певною програмою рухаються зворотно-поступально, а заготованка за допомогою маніпулятора рухається поступально і обертається, в результаті чого отримують циліндричну заготованку змінного по довжині поперечного перерізу.

СТАН ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ – вид обладнання для ОМТ, складений з кількох послідовно розташованих клітей, в кожній з яких у вальницях розміщені два вали, на яких установлено складений дисковий інструмент, що обертається через систему передач (клино-пасових, ланцюгових, зубчастих тощо) електродвигуном і в процесі прямолінійного поздовжнього руху листа або стрічки формує з цієї заготованки гнутий профіль необхідної (переважно складної) форми.

Друга класифікаційна ознака – *режим дії.* За цією ознакою усе обладнання для ОМТ можна розділити на чотири види: 1) обладнання звичайної дії, в якому оператор керує не тільки початком дії, але й контролює увесь робочий процес (Наприклад, може зупинити його на будь-якій ділянці ходу); 2) обладнання напівавтоматичної (циклічної) дії, в якому оператор керує лише початком циклу (включає машину на робочий хід, а машина самостійно виконує повний цикл обробки, при чому втрутитись у робочий процес оператор не може); 3) обладнання автоматичної дії, яке після запуску оператором виконує робочі цикли безперервно (в автоматичному режимі) доки не буде зупинено; 4) обладнання з числовим програмним управлінням (ЧПУ), яке за спеціальною програмою виконує різноманітні цикли (в тому числі із зміною робочих інструментів).

Третя класифікаційна ознака – *джерело енергії.* Як енергоносій для обладнання може виступати: 1) водяна пара; 2) стиснене повітря або газ; 3) рідина високого тиску; 4) електрична енергія; 5) хімічна енергія.

Хімічну енергію як джерело для КШО використовують рідко (лише в установках для вибухового та вибухового газового штампування). Для цих видів обладнання використовують або вибухові речовини (ВР), або природні горючі гази. Стиснене повітря або газ як джерело енергії використовують теж рідко (лише у штампувальних пароповітряних молотах із невеликою масою упадних частин та у високошвидкісних молотах). Водяну пару (зазвичай перегріту) використовують відносно рідко (лише в молотах та парогідравлічних мультиплікаторах гідравлічних кувальних пресів).

Широке застосування має рідина високого тиску (вода, емульсія, різні види рідкого масла). Але виокремлювати цей вид енергії варто лише в тому випадку, коли на підприємстві є окрема насосно-акумуляторна станція, яка живить рідиною високого тиску кілька різноманітних одиниць обладнання для ОМТ (іноді навіть у різних цехах).

Найчастіше для роботи КШО використовують електричну енергію. Усі механічні та гідравлічні листоштампувальні преси (з індивідуальним приводом), автомати та обладнання з ЧПУ живляться лише електричною енергією. Так само усі види обладнання для електрогідравлічного

штампування, газостати та гідростати, а також обладнання для магнітно-імпульсної обробки металів живляться виключно електричною енергією.

Четверта класифікаційна ознака – *вид головного виконавчого механізму* (ГВМ).

ГВМ усіх різновидів молотів – це пневмоциліндр або гвинт. Лише в окремих типах молотів використовують гідроциліндри. Гідроциліндри широко використовують як ГВМ у гідравлічних пресах.

Найширше застосування мають різноманітні корбові механізми (корбово-поковзневий, корбово-колінчастий, корбово-важільний механізми).

Кулачкові механізми як ГВМ використовують рідко: в роторних автоматах, а також для виготовлення складних деталей в спеціальних автоматах, переважно для згинання. Це обумовлено тим, що кулачок і спряжений з ним штовхач (або навіть ролик) утворюють вищу кінематичну пару, яка досить інтенсивно зношується.

Певне поширення мають гвинтові механізми, наприклад гвинтові молоти, де обертовий рух крутня за допомогою гвинтової передачі перетворюється на поступальний рух поковзня з інструментом.

Досить екзотичним в наш час є електромагнітний ГВМ. Він має вигляд лінійного електродвигуна, в якому створюється біжуче магнітне поле, яке урухомлює частини обладнання, наприклад, упадні частини (бабу із штампом) в електромагнітному молоті.

П’ята класифікаційна ознака – *кратність дії.* На жаль, тлумачення цієї ознаки дещо різне для різних видів обладнання. Наприклад, молот простої дії визначається як вид обладнання, в якому джерело енергії (пара або стиснене повітря) рухають бабу лише догори, а робочий хід здійснюється за рахунок переходу потенційної енергії піднятих упадних частин у кінетичну енергію протягом холостого ходу донизу. Молот подвійної дії визначається як вид обладнання, в якому джерело енергії (пара або стиснене повітря) рухають бабу і вгору, і донизу. У той же час прес простої дії визначається як вид обладнання, в якому джерело енергії рухає поковзень і вгору, і донизу, але рухає тільки один поковзень. Прес подвійної дії (як механічний, так і гідравлічний) визначається як вид обладнання, в якому є два ГВМ і два поковзні. Наприклад: один для притискування заготованки, а другий – для виконання технологічної операції (глибокого витягування заготованки). В останні роки набули поширення преси потрійної дії (переважно для чистового вирубування). Щоб уніфікувати тлумачення терміна «кратність дії» домовимось про таке: 1) стосовно молотів усталене використання цієї ознаки залишити; 2) стосовно усіх інших видів

обладнання кратність дії будемо визначати кількістю переходів, які здатне виконати дане обладнання за одну операцію.

Поняття «обладнання з ГВМ групової дії» у відомих класифікаціях взагалі не зустрічається. Обладнання з ГВМ групової дії – це переважно обладнання для високоенергетичних способів обробки тиском (вибухового, електрогідравлічного тощо). У ньому передбачено кілька зарядів ВР або електричних розрядників, які об'єднані в групи і які спрацьовують в заданій послідовності, викликаючи локальну деформацію складної за формою деталі.

Шоста класифікаційна ознака – ***напрям сили деформації.*** Відповідно до неї усі види обладнання для ОМТ можна поділити на чотири види: 1) вертикальний; 2) горизонтальний; 3) похилий; 4) комбінований. Треба зауважити, що обладнання простої дії може мати якийсь один напрям сили деформації; обладнання подвійної та потрійної дії часто має комбінований напрям сили деформації: частково вертикальний, частково горизонтальний, частково похилий.

Сьома класифікаційна ознака – ***спосіб замикання сили деформації.*** Залежно від принципу дії розрізняють рамну або колонну конструкцію станини для всіх видів обладнання, крім молотів. Така станина сприймає силу деформації, тому її розраховують на номінальне навантаження, яке виникає в процесі деформації заготовки. Рамна конструкція може бути відкритою (С-подібною) або закритою. Остання найчастіше є суцільною. Її виготовляють або зварюванням, або литтям.

Колонна конструкція завжди є складеною з верхньої та нижньої поперечки та чотирьох (іноді двох, зовсім рідко – з трьох) колон, які ці поперечки з'єднують за допомогою гайок. Колонну конструкцію також розраховують на номінальну силу, яка виникає в процесі деформації заготовки.

Для молотів розрізняють шаботну й безшаботну конструкцію. У шаботній конструкції енергія удару сприймається нижньою частиною молота – шаботом. Маса шабота у 20…25 разів більша за масу баби. Лише за цієї умови коефіцієнт корисної дії удару молота виявляється задовільним. Шабот значно збільшує масу молота, але не поглинає усієї енергії удару рухомих частин (штампа, баби, штока, поршня). Тому іноді використовують безшаботні молоти, в яких реалізується ідея зустрічного удару. Але конструктивне виконання безшаботних молотів досить складне. Проте основною причиною, через яку вони не набули широкого розповсюдження (хоча й мають дуже багато переваг перед шаботними) – це те, що нижня частина штампа має бути рухомою. Це заважає виконувати такі поширені в практиці молотового штампування операції, як підкочування та протягування. Тому технологічні можливості безшаботних молотів виявляються значно звуженими.

Восьма класифікаційна ознака – ***кількість позицій для деформації заготованки.*** Цей показник суттєво впливає на продуктивність роботи обладнання.

Найширше розповсюдження набули однопозиційні машини для ОМТ. Проте в такі машини можна встановлювати багатопозиційні штампи і обробляти заготованку за кілька переходів. При цьому можна витрачати один робочий хід як для кожної позиції окремо, так і для кількох позицій одночасно. В останньому випадку прес має бути обладнаний спеціальним пристроєм для автоматичного перекладання заготованки з позиції на позицію. Досить широко використовують багатопозиційні автоматизовані преси-автомати. Наприклад, у листовому штампуванні застосовують навіть 10-ти позиційні преси-автомати.

Дев'ята класифікаційна ознака – ***вид деформації.*** Розрізняють три основних види деформації, які зазначені у таблиці 1. Вид деформації суттєво впливає як на продуктивність роботи обладнання, так і на його кінематичні та розмірні характеристики. Крім того, вид деформації суттєво впливає на стійкість штампів.

Відомо, що з підвищенням температури напруження течії зменшується, а тому зменшується і зусилля деформації. В середньому зусилля гарячої деформації в десять разів менше за зусилля холодної. Тому гарячу деформації використовують переважно для обє'много штампування як на молотах, так і на пресах. Крім того, відомо, що при переході на штампування з молота на корбовий гарячештампувальний прес покованок із тонкими елементами стійкість штампів зменшується у кілька разів через значний термічний вплив заготованки на штамп. Тому для гарячого та напівгарячого штампування треба віддавати перевагу швидкохідному обладнанню, а для холодного об'ємного штампування – тихохідному.

Десята класифікаційна ознака – *вид заготованки.* В ковальсько-штампувальних цехах найчастіше використовують сортове або листове вальцювання. Досить часто для складних штампованок використовують покованки. Наприклад, гонки для крупних дизельних двигунів виготовляють комбінованим способом – куванням отримують заготованки у відповідності з епюрою діаметрів, а штампуванням – гонки. Досить часто для калібрування та карбування як заготованку використовують штампованку.

Останнім часом все ширшого розповсюдження набуває штампування (компактування) порошкових матеріалів.

Одинадцята класифікаційна ознака – ***технологічне призначення.*** В існуючих класифікаціях досить часто ця ознака визначає лише назву обладнання. Наприклад, штампувальний молот, гідравлічний прес, ножиці,

вирубний прес тощо. А основні конструктивні особливості обладнання при цьому до уваги не беруться. Про це обладнання можна спитати: який саме молот (пароповітряний, гідравлічний тощо), які саме ножиці (корбові, гідравлічні, імпульсні тощо), який вирубний прес (звичайний, напівавтоматичний, автоматичний, із ЧПУ тощо). Більш того, на догоду виробничникам часто-густо технологічне призначення не відповідає назві, наприклад, Ось приклади: горизонтально-кувальна машина (ГКМ). Та це ж зовсім не кувальна, а штампувальна машина, а за принципом дії – це прес (див. першу класифікаційну ознаку); кувальні вальці – це обладнання для попереднього формування заготованки відповідно до епюри діаметрів, а зовсім не для кування; ексцентрикові преси. На виробництві дуже часто ексцентриковим називають преси з кривошипним валом. Вірогідно, це пов'язано з тим, що з метою регулюваннях ходу поковзня преса на кінець кривошипного валу одягають ексцентрикову шайбу. Але факт залишається фактом – вал залишається кривошипним. На жаль, таких прикладів можна навести дуже багато. Тому технологічне призначення обладнання обов'язково необхідно давати, але лише після конструктивних ознак обладнання.

Висновки. 1. Наведена автором детальна класифікація дає можливість дати вичерпну уніфіковану назву будь-якому обладнанню. Наприклад: механічний (1) прес-автомат (2) з корбово-поковзневим ГВМ (4) простої дії (5) горизонтальний (6) рамної конструкції (7) однопозиційний (8) для холодного (9) видавлювання (10) заготовок із сортового вальцювання (11). У цій назві пропущена ознака (3). Але для преса джерело енергії – це електрична енергія. Якби якісь варіанти реалізації даної конструкції були відмінними від зазначених вище, їх треба було б згадати у назві обладнання.

2. Морфологічний ящик містить 10 206 000 чарунок і вичерпує усі принципово можливі й принципово неможливі варіанти конструктивного виконання та технологічного використання будь-якого обладнання для ОМТ, якщо за класифікаційні ознаки прийняти 11 згаданих вище. Серед цієї кількості є й поки що невідомі, але перспективні конструкції обладнання. Їх можна знайти за допомогою новітніх інформаційних технологій із застосуванням сучасних ЕОМ.

Проте генерування нових конструкцій обладнання для ОМТ за допомогою ЕОМ – це вже інша досить складна задача, яку буде розглянуто у наступному.

Список літератури: **1.** *Залесский В.И.* Оборудование кузнечно-прессовых цехов. – М.: Высшая школа, 1964. – 599 с. **2.** *Зимин А.И.* Машины и автоматы кузнечно-штамповочного производства: Часть 1. Молоты. – М.: Машгиз, 1953. – 459 с. **3.** Штампы для горячего деформирования металлов / Под ред. проф. М.А.Тылкина. – М.: Высшая школа, 1977. – 496 с. **4.** Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник для машиностроительных вузов / А.Н.Банкетов, Ю.А.Бочаров,

Н.С.Добринский и др. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1982. – 576 с. **5.** Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании) / А.И.Половинкин, Н.К.Бобков, Г.Я.Буш и др. – М.: Радио и связь, 1981. – 344 с.

Bibliography (transliterated) 1. Zalessky W.I. Oborudovanie kuznechno-pressowych zechov. – Moscow: Vysschaja schkola. 1964. – 599 p. **2.** Zimin A.I. Machiny and автоматы of Kuznechno-schtampovochnogo proizvodstwa: Chastj 1. Moloty.. – Moscow: Mashgiz, 1953. – 459 p. 3. Schtampy dlja goryachego deformirovanija metallov./Pod red.prof. M.A.Tylkina.. – Moscow: Vysschaja schkola. 1977. – 496 p. 4. Kuznechno-schtampovochnoe oborudovanie: Uchebnik dlja machinostroitelnych vuzov A.N.Banketov i dr.. – 2-e izd, – Moscow: Machinostroenie. 1982. – 576 p. 5. Avtomatizatsija poiskovogo konstruirovanija (iskusstvennyj intellect v maschinnom proektirovanii) / A.I.Polovinkin i dr. – Moscow: Radio i svjaz, 1981. – 344 p.

Надійшла (received) 29.11.2014

УДК 621.771.01

С. В. ЕРШОВ, докт. техн. наук, проф., ДГТУ;
С. Н. МЕЛЬНИК, канд. техн. наук, гл. калибровщик, ПАО «ДМКД»;
К. Г. ГЕЙМУР, и. о. начальника сортопрокатного цеха, ПАО «ДМКД»;
Е. А. КРАВЧЕНКО, аспирант, ДГТУ, Днепродзержинск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ ШВЕЛЛЕРА

Несмотря на большое количество экспериментальных исследований швеллеров, закономерности поведения металла при прокатке в калибрах швеллерной формы изучены недостаточно. Изложены результаты сопоставления данных экспериментального и теоретического исследования деформированного состояния швеллера при прокатке в 9 клети среднесортного стана 350 ПАО «ДМКД». Рассмотрено и проанализировано формоизменение металла в различных сечениях раската. Установлено наличие значительной неравномерности распределения уширения и вытяжки в очаге деформации, установлены закономерности их распределения.

Ключевые слова: деформация, фланцевые профили, швеллер, калибр, течение металла.

Введение. Профили, оси отдельных элементов которых расположены под некоторым углом (чаше всего 90°) к соединяющей их части, называются фланцевыми [1]. К таким профилям относятся балки, швеллеры, рельсы, тавровые профили, колонные балки и некоторые другие [2]. Форма этих профилей значительно отличается от формы заготовки, поэтому их невозможно получить путем применения равномерного обжатия раската [3]. К калибровке фланцевых профилей предъявляются высокие требования. От её совершенствования во многом зависит производительность прокатных станов, срок службы оборудования, а также качество и себестоимость продукции.

Анализ последних исследований и литературы. Швеллеры прокатывают на рельсобалочных и сортовых станах различного типа, в

© С. В. Ершов, С. Н. Мельник, К. Г. Геймур, Е. А. Кравченко, 2014

зависимости от размера швеллера, особенностей конструкции профиля и требуемой производительности [4].

Особенность прокатки любого фланцевого профиля заключается в том, что его невозможно получить из прямоугольной заготовки или слитка, используя равномерное обжатие, как при прокатке простых профилей. Также к особенностям относятся наличие боковых обжатий в отдельных частях калибра. Однако при правильной и рациональной калибровке неравномерная деформация, неизбежная при прокатке фланцевых профилей, осуществляется только в первых проходах, когда металл имеет более высокую температуру и пластичность, чем в последующих калибрах. В остальных проходах стараются применять равномерные обжатия, обеспечивающие равномерность вытяжек всех элементов профиля. Соблюдая эти условия, можно получить конечный профиль правильной формы и без значительных внутренних напряжений при минимальном расходе энергии [2].

Теоретические и экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния при прокатке швеллеров проводились разными учеными [5–11]. В этих работах основное внимание уделялось установлению общих закономерностей деформированного состояния с получением формул расчета конечного формоизменения.

Теоретические исследования, проведенные ранее, из-за сложностей построения математических моделей с использованием метода Ритца, не позволяли учесть реальную форму заготовки и калибра. Это, в свою очередь, не позволило точно смоделировать видоизменение потоков металла внутри очага деформации.

На общеинтегральные показатели деформированного состояния это влияет слабо, а вот на напряженное состояние влияние значительно, поскольку хорошо известно, что малейшее изменение в схеме течения металла может привести даже к смене знака напряжений.

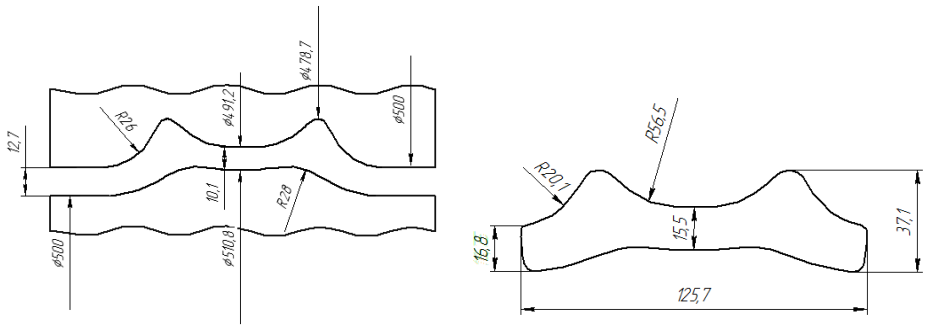
В настоящее время существует возможность более точного, чем ранее, учета формы инструмента и заготовки при теоретическом изучении процесса прокатки. Это открывает новые перспективы в изучении теории процессов, происходящих в очаге деформации. Именно эта теория в последующем даёт возможность создания строго контролируемых и управляемых технологических процессов.

Известно, что рациональная конструкция калибров и выбор оптимальных режимов деформации, улучшение качества продукции невозможны без учета деформированного состояния металла при прокатке и знаний о его течении в очаге деформации. Не взирая на большое количество ранее проведенных исследований формоизменения металла при прокатке в калибрах, вопросы

поведения металла при прокатке сложных фасонных профилей остаются недостаточно изученными, что связано с многофакторностью сложных процессов, протекающих в очаге деформации, а также непрерывным развитием технологии производства и теории прокатки. В связи со всем выше изложенным все чаще применяются компьютерные технологии, позволяющие исследовать сложные случаи прокатки.

Цель исследования, постановка проблемы. Целью данной работы является: изучение формоизменения металла в неупрощенном очаге деформации; сопоставление производственных экспериментальных и теоретических картин деформированного состоянии металла при прокатке в швеллерном калибре; объяснение сложных явлений при прокатке швеллеров.

Материалы исследований. Для экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния при прокатке швеллера были отобраны недокаты со стана 350 ПАО «ДМКД». Исследуемый недокат взят из девятой клети. На рис. 1 представлены размеры выбранного калибра и заготовки.



а б

Рис. 1 – Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния при прокатке швеллера: а – размеры формообразующего калибра; б – форма и размеры заготовки

Для вычерчивания сечений раската по длине очага деформации без разрушения профиля на кафедре ОМД ДГТУ был изготовлен профилограф. Полученные очертания были отсканированы и выполнены в электронном виде. Всего по длине очага деформации – 72 мм, было получено 13 сечений, расстояние между которыми составило 6 мм.

При выполнении расчетов исследуемый раскат был поделен на элементы таким образом, как это делают при расчёте калибровки валков для прокатки швеллера (см. рис. 2).

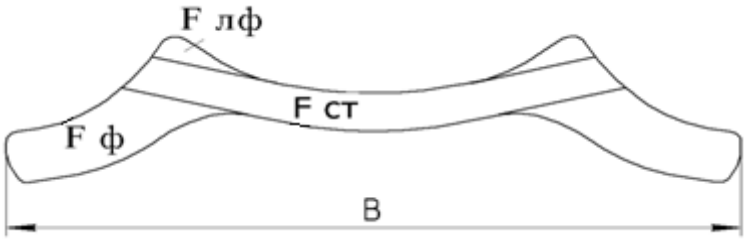


Рис. 2 – Схема разбивки раската на участки и расстановки размеров

Для исследования деформированного состояния были вычислены общие коэффициенты вытяжки по участкам раската и коэффициенты уширения в каждом из исследуемых сечений по следующим формулам:

$$\lambda_i = \frac{F_0}{F_i}, \tag{1}$$

где λ_i – общий коэффициент вытяжки на исследуемом участке;

F_0 – начальная площадь раската, мм^2;

F_i – площадь сечения исследуемого участка, мм^2.

$$\beta_i = \frac{B_i}{B_0}, \tag{2}$$

где β_i – коэффициент уширения в исследуемом сечении;

B_i – ширина раската в сечении, мм;

B_0 – начальная ширина раската, мм.

Площади отдельных элементов раската по сечениям вычислялись в программе КОМПАС-3D.

Теоретическое исследование выполнялось с использованием программного пакета ESV Deform, разработанного на кафедре ОМД ДГТУ, который в качестве математического аппарат использует метод конечных элементов и вариационный принцип механики сплошных сред. Для расчета методом штрафных функций используется уравнение:

$$\delta\left[\frac{1}{2}\int_V \mu H^2 dV - \int_S \sigma_\tau \upsilon_\tau dS + t_1 \int_V \varepsilon_0^2 dV + t_2 \int_S \left(\upsilon_n - \omega_n\right)^2 dS\right] = 0, \tag{3}$$

где μ – условная вязкость металла;

H – интенсивность скоростей деформации сдвига;

σ_τ и υ_τ – полное напряжение трения и скорость скольжения металла по поверхности инструмента S;

t_1 – штрафная константа на невыполнение условия несжимаемости;

$\varepsilon_0 = \frac{1}{3}\left(\xi_x + \xi_y + \xi_z\right)$ – скорость относительного изменения объема;

t_2 – штрафная константа на невыполнение условия непроницаемости;

υ_n – проекция скорости течения металла в данной точке контактной поверхности на нормаль к поверхности в этой точке;

ω_n – проекция скорости движения инструмента на нормаль к поверхности контакта в данной точке.

С общей методикой моделирования можно ознакомиться в работе [12].

Во время теоретического моделирования процесса прокатки использовались следующие исходные данные: была использована тетраэдральная сетка, длина каждой стороны треугольника составила 6 мм; диаметры валков по буртам – 500 мм; скорость прокатки – 5 м/с; температура прокатки – 1050°С.

Результаты исследования. В ходе экспериментального исследования деформированного состояния металла по данным измерения размеров сечений раската вдоль очага деформации были построены графики распределения вытяжки и уширения по длине очаге деформации (см. рис.3, 4).

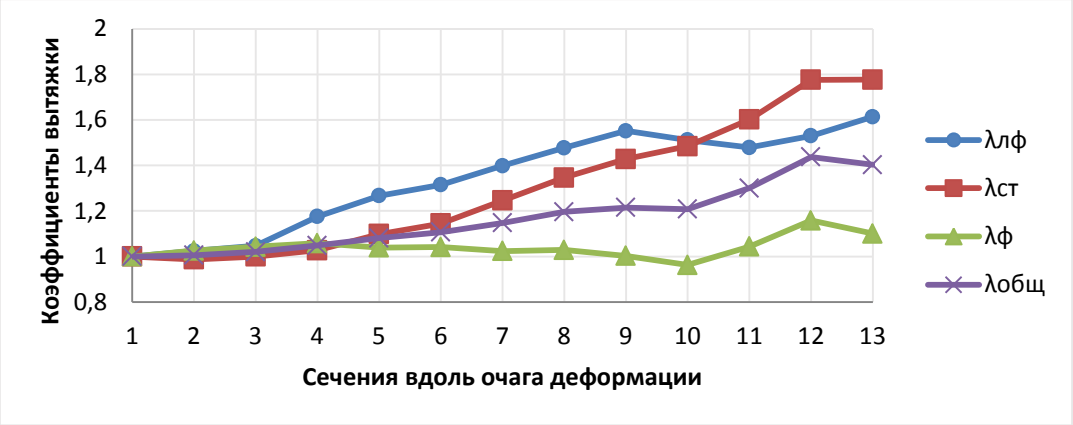


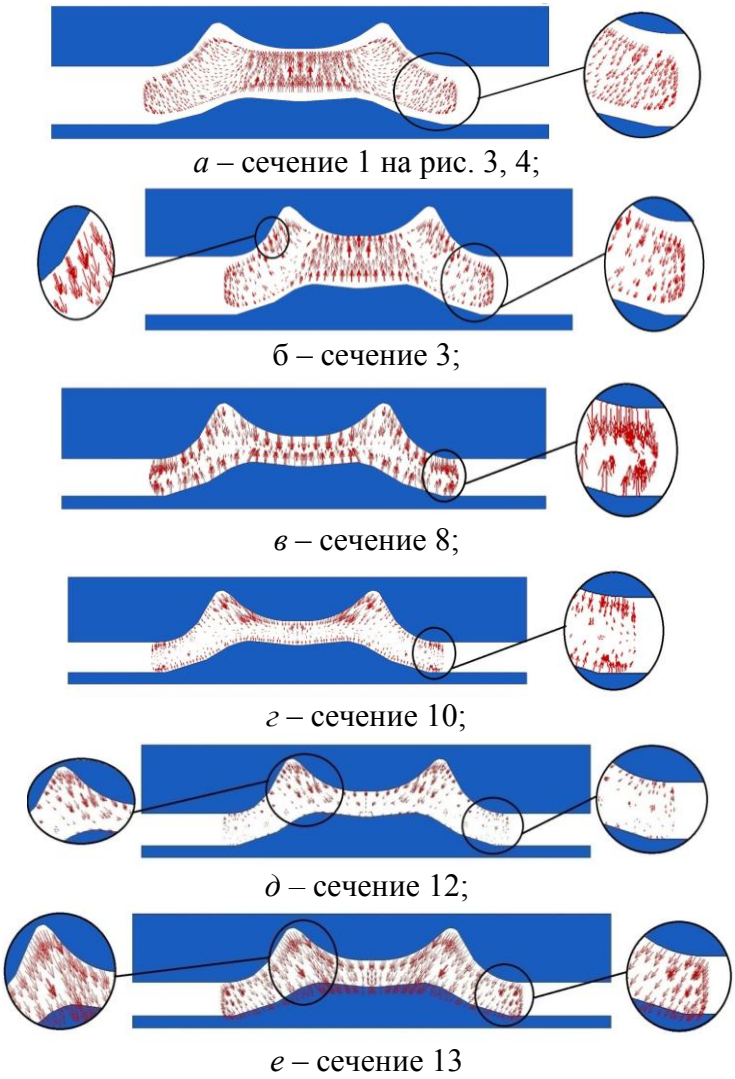
Рис. 3 – График распределения вытяжки по элементам раската вдоль очага деформации

Рис. 4 – График распределения уширения по длине очага деформации

Как видим, вытяжка по элементам раската в процессе прокатки распределяется неравномерно. В начальный момент наибольшее удлинение получают ложные фланцы, при этом наблюдаются участки с утяжкой фланцев. После 4 участка начинает равномерно возрастать вытяжка стенки. Наименьшее значение имеет вытяжка по фланцам. Удлинение по фланцам уменьшается на

участках возрастания уширения (участки 8–10) и наоборот – вытяжка возрастает на участках, где наблюдается утяжка фланцев по ширине (участки 10–12). Коэффициент вытяжки фланцев меньше, чем коэффициенты вытяжки ложных фланцев и стенки.

Уширение изменяется сложным образом. Его общая величина составляет 1 мм. До пятого сечения наблюдается равномерная утяжка по ширине профиля. Затем раскат начинает уширяться – когда все его части вступают в контакт с валками. При этом на рис. 3 мы наблюдаем уменьшение вытяжки по фланцам. Пика уширение достигает в 10 сечении, но уже после выхода раската из очага деформации, в 12 сечении, снова наблюдается утяжка фланцев по ширине. Когда в 13 сечении уширение возрастает (см. рис. 3), на графике мы видим незначительное уменьшение значения общего коэффициента вытяжки.



а – сечение 1 на рис. 3, 4;

б – сечение 3;

в – сечение 8;

г – сечение 10;

д – сечение 12;

е – сечение 13

Рис. 5 – Векторное поле скоростей при прокатке швеллера

В процессе теоретического моделирования деформированного состояния профиля также наблюдается утяжка раската по ширине. На рис. 5, *а* наблюдаем

сечение раската за 10 мм до касания металла с валками. Видим, что раскат начинает утягиваться по ширине, о чем свидетельствует направление векторов поля скоростей. Объяснить наблюдаемое явление можно тем, что раскат начинает обжиматься в области стенки и наружной стороны боковых граней ложных фланцев, возникают тянущие силы, которые вытягивают профиль в длину и утягивают его по ширине. На рис. 5, *б* видно, что в момент касания раската с валками описанная картина течения металла сохраняется. Видим, что со стороны нижнего ручья первой начинает обжиматься стенка. Ложные фланцы обжимаются со стороны наружных боковых граней верхнего ручья калибра. В это время фланцы еще не обжимаются. В результате металл фланцев продолжает утягиваться по ширине.

Внутри очага деформации, когда все части раската вступают в контакт с валками, наблюдаем перетекание металла в среднюю часть калибра. Утяжка фланцев уже не происходит, они постепенно начинают уширяться (см. рис. 5, *в*). На рис. 5, *г* изображено векторное поле скоростей за 4 мм до выхода за ось валков. Металл продолжает перетекать в среднюю часть калибра, но уже менее интенсивно. Более активное течение металла наблюдается в ложных фланцах. Через 5 мм после выхода за ось валков (см. рис. 5, *д*) начинается активное выравнивание скоростей продольного течения металла. В результате течение металла во фланцах практически отсутствует, из более обжатых ложных фланцев металл перетекает в стенку. Нижние кромки фланцев смещаются к средней части раската. Разница в течении металла фланцев вдоль нижней и верхней контактных поверхностей объясняется различной формой верхнего и нижнего ручья. А еще через 10 мм (см. рис. 5, *е*) можно наблюдать, как раскат начинает изгибаться вниз.

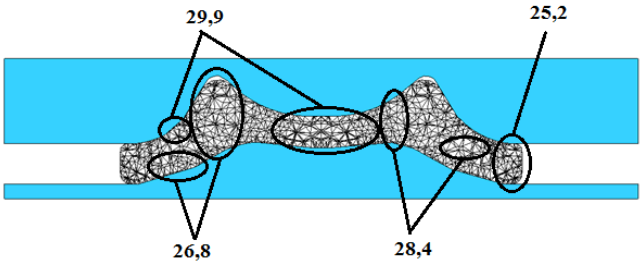


Рис. 6 – Степень деформации раската, %

На рис. 6 приведено распределение степени деформации раската перед выходом из очага деформации. Как видим, наибольшее обжатие получила стенка. Отсюда и высокое значение коэффициента вытяжки на графике (рис. 3). Не смотря на меньшую степень обжатия, ложные фланцы получили значительное удлинение. Это можно связать с тем, что выпуклая форма

верхнего ручья калибра во время обжатия раската способствует интенсивному течению металла к боковым граням. Наименьшее обжатие наблюдается по фланцам, что также объясняет небольшое уширение раската и минимальное значение коэффициента вытяжки.

Среднее отклонение расчетных геометрических параметров от размеров полученного раската составляет 3%. Наибольшая погрешность – 1 мм, наблюдается по высоте ложных фланцев. Погрешность по общей ширине раската составила 0,05 мм. Отклонение по площади раската – 1,1%.

Выводы. В статье выполнено сравнение экспериментального и теоретического исследования деформированного состояния металла при прокатке швеллера в 9 клети стана 350 ПАО «ДМКД». Сопоставление показало идентичность характера течения металла. Установлены закономерности изменения вытяжки и удлинения по длине очага деформации, позволяющие оценить деформированное состояние и понять причины наблюдаемых на практике явлений.

Список литературы: 1. *Бахтинов Б. П.* Калибровка прокатных валков /*Б. П. Бахтинов, М. М.Штернов* – М.: Металлургиздат, 1958. – 784 с. **2.** *Илюкович Б. М.* Прокатка и калибровка: Справочник в 6 т. – Днепропетровск: РИА «Днепро-вал». – 2004 – Т.5: Калибровка швелерообразных и корытообразных профилей / *Б.М. Илюкович, Н.Е. Нехаев, В.П. Капелюшный.* – 2004. – 481 с. **3.** *Коновалов Ю. В.* Металлургия: учебное пособие в трех книгах. – Донецк: *ГВУЗ «ДонНТУ»*. – 2013. – Т. 3 / *Ю. В. Коновалов, А. А. Минаев.* – 2013. – 603 с. **4.** *Грудев А. П.* Технология прокатного производства: учебник для ВУЗов / *А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин*. – М.: «Металлургия», 1994. – 656 с. **5.** *Мутьев М. С.* Калибровка черновых валков / *М. С. Мутьев*. – М. «Металлургия», 1964. – 190 с. **6.** *Тарновский И. Я.* Элементы теории прокатки сложных профилей / *И. Я. Тарновский, А. Н. Скороходов, Б. М. Илюкович*. – М.: «Металлургия», 1972. – 352 с. **7.** *Старченко Д. И.* Исследование характера деформации при прокатке в швеллерных калибрах / *Д. И. Старченко, А. В. Сидоренко*// Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1969. – №8. – С. 95–98. **8.** *Бергеман Г. В.* Особенности применения развернутой калибровки швеллеров при производстве профиля U200 в условиях стана 550 / *Г. В. Бергеман, С. М. Антонюк, А. А. Самсоненко* // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – №6. – С. 50–52. **9.** *Тубольцев А. Г.* Опыт и проблемы применения кассет конструкции ДМетИ с неприводными вертикальными валками при прокатке швеллеров / *А. Г. Тубольцев* // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 8–9. – С. 226–231. **10.** *Бергеман Г. В.* Новый способ развернутой калибровки валков для прокатки швеллеров с использованием открытого контрольного предчистового калибра / *Г. В. Бергеман* // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – №5. – С. 60–63. **11.** *Луцкий М. Б.* Особенности производства швеллеров в калибрах с переменным изгибом стенки / *М. Б. Луцкий, А. А. Чичкан, В. А. Луценко* // Черные металлы. – 2012. – №8. – С. 23–28. **12.** *Илюкович Б.М.* Теоретические основы обработки металлов давлением. В 2 т. Том 2. / *Б.М. Илюкович, А.П. Огурцов, Н.Е. Нехаев, С.В. Ершов.* – Днепропетровск: РИА «Днепро-ВАЛ», 2002. – 485 с.

Bibliography (transliterated): 1. Bakhtinov B. P. and M. Shternov. *Kalibrovka prokatnikh valkov*. Moscow: Metallurgizdat, 1958. Print. **2.** Ilyukovich B. M., N. E. Nehaev and V. P. Kapelyushniy. Prokatka I kalibrovka. Vol. 5. Kalibrovka shvelleroobraznyh i korytnyh profiley. Dnepropetrovsk: RIA «Dnepro-VAL», 2004. Print. **3.** Konovalov Yu. V. and A. A. Minaev. *Metallurgia*. Vol. 3. – Donetsk: «DonNTU», 2013. Print. **4.** Grudev A. P, L. F. Mashkin and M. I. Hanin. *Tehnologiya prokatnogo proizvodstva*. Moscow: Metallurgiya, 1994. Print. **5.** Mut'ev M. P. *Kalibrovka chernovih valkov*. Moscow: Metallurgiya, 1964. Print. **6.** Tarnovskiy I. Ya., A. N. Skorohodov and B. M. Ilyukovich. *Elementy teorii prokatki slozhnih profiley*. Moscow: Metellurgia, 1972. Print. **7.** Starchenko D. I. and A. V. Sidorenko. «Issledovanie haraktera

deformacii pri prokatke v shvellernih kalibrah». *Izvestiya VUZov: Chernaya Metallurgiya.* No.3. 1969. 95 – 98. Print. **8.** Bergeman G. V., P. M. Antonyuk and A. A. Samsonenko. «Osobennosty primeneniya razvernutoy kalibrobky shvellerov pri proizvodstve profilya U200 v usloviyah stana 550». *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. No. 6. 2013. 50–52. Print. **9.** Tubol'tsev A. G. «Opyt i problemy primeneniya kasset konstrukcii DMetI s neprivodnymi vertikal'nymy valkami pri prokatke shvellerov». *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. No. 8–9. 2002. 226 – 231. Print. **10.** Bergeman G. V. «Noviy sposob razvernutoy kalibrovki valkov dlya prokatki shvellerov s ispol'zovaniem otkrytogo kontrol'nogo predchistovogo kalibra». *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. No. 5. 2007. 60–63. Print. **11.** Lutskiy M. B., A. A. Chichkan and V. A. Lutsenko. «Osobennosty proizvodstva shvellerov v kalibrah s peremennym yzgibom stenky». *Chernye metally*. No. 8. 2012. 23–28.Print. **12.** Ilyukovich B. M. Teoreticheskie osnovy obrabotky metallov davlenieMoscow Vol. 2. Dnepropetrovsk: RIA «Dnepro-VAL», 2002. Print.

Поступила (received) 28.10.2014

УДК.621.771.63

А. С. ЗАБАРА, аспирант, НТУ «ХПИ»

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ТРУБ

Приведено устройство, позволяющее определить энергосиловые параметры процесса и деформированное состояние металла при формообразовании профильных труб. Получаемые результаты обеспечивают оценку основных технологических параметров процесса формообразования и прочностных характеристик проектируемого технологического оборудования. Устройство целесообразно использовать для экспериментальных исследований различных технологических процессов производства гнутых профилей.

Ключевые слова: профильная труба, устройство, формообразование, энергосиловые параметры процесса.

Введение. В Украине производство гнутых профилей замкнутого сечения развито недостаточно [1–3], в литературе отсутствуют данные, позволяющие разработать промышленную технологию их производства, имеет место значительное количество импортной продукции, в связи с чем, работы направленные на создание научных и технологических основ их импортозамещающего производства, являются важными и актуальными.

Отсутствие технологии производства гнутых профилей замкнутого сечения или невозможность точного определения исходных данных по стадиям исследуемых процессов приводит к завышению либо занижению запасов прочности проектируемого технологического оборудования.

Цель исследований, постановка проблемы. Цель настоящей работы является разработка устройство для определения энергосиловых параметров

© А. С. Забара, 2014

процесса формообразования гнутых профилей замкнутого сечения и их деформированного состояния.

В соответствии с поставленной целью в работе решены следующие **задачи**:

– разработка методики для определения энергосиловых параметров процесса формообразования гнутых профилей замкнутого сечения;

– разработка методики для определения деформированного состояния металла гнутых профилей замкнутого сечения.

Устройство для определения энергосиловых параметров. Разработанное устройство (рис. 1) целесообразно использовать для экспериментальных исследований различных технологических процессов производства гнутых профилей.

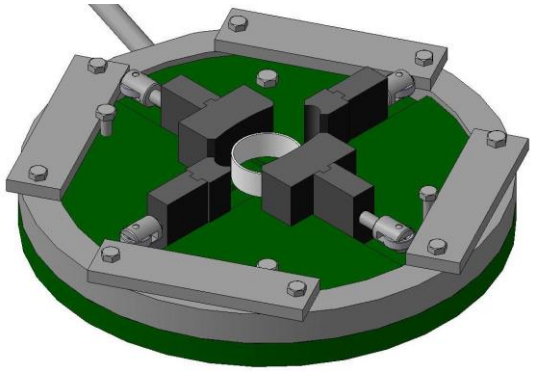


Рис. 1 – Модель устройства для определения энергосиловых параметров процессов обработки металлов давлением

Устройство относиться к способам получения гнутых профилей замкнутого сечения из предварительно сформованных трубных заготовок на трубоэлектросварочном агрегате, состоящего из *n*-клетевого прокатного модуля, и оснащенного формовочными клетями, калибровочными клетями и универсальными четырехвалковыми клетями.

При профилировании для правильного выбора технологии производства гнутых профилей замкнутого сечения, необходимо знать исходные данные (давления металла на оснастку, крутящий момент, работу деформирования) [4].

Основной задачей, при проектировании данного устройства, является обеспечение возможности определения напряженно-деформированного состояния металла, профилируемого в универсальных четырехвалковых клетях и энергосиловых параметров технологического процесса валковой формовки.

Поставленная техническая задача решена таким образом, что в устройстве для определения энергосиловых параметров процессов обработки металлов давлением, применены направляющие, связанные с приводом осевого

перемещения, узлом деформирования и контрольно-измерительной аппаратурой испытательной машины. Узел деформирования выполнен в виде сменных губок (обеспечивают моделирование различных рабочих калибров), кинематически связанных с направляющими и установленных с возможностью регулировочного перемещения навстречу друг друга.

На рис. 2 схематически показано устройство для определения энергосиловых параметров процессов обработки металлов давлением. Устройство для определения энергосиловых параметров процессов обработки металлов давлением, закрепляется на испытательной машине, оснащенной контрольно-измерительной аппаратурой (не показаны).

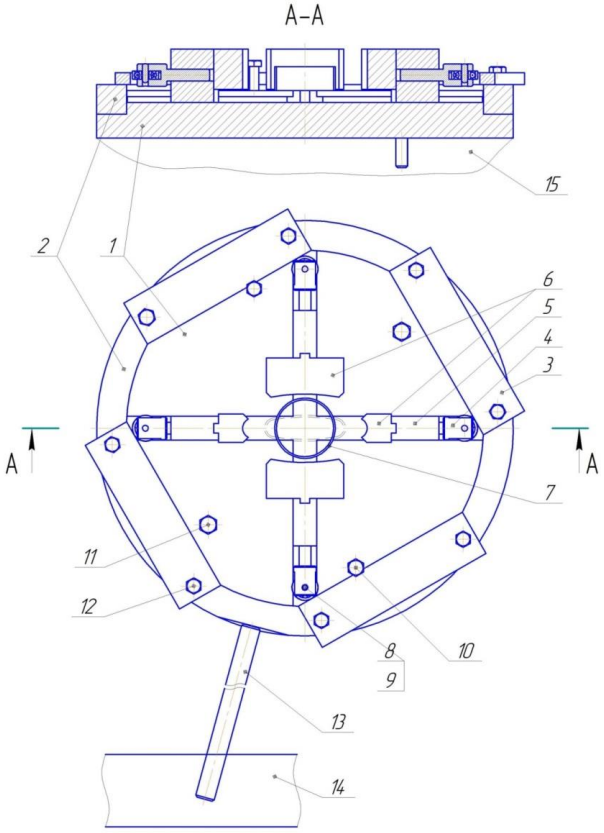


Рис. 2 – Устройство для определения энергосиловых параметров процессов обработки металлов давлением: 1 – кольцо; 2 – основание; 3 – планка; 4 – ось; 5 – направляющая; 6 – губка; 7 – образец (труба круглая); 8 – штифт; 9 – подшипник; 10, 11, 12 – болт; 13 – рукоять; 14 – пресс; 15 – стол

Принцип работы устройства для определения энергосиловых параметров процессов обработки металлов давлением, заключается в следующем. На основание по центру размещается образец. Губки 6 размещаются в пазах направляющих 5. Далее посредством вращения осей 4 прикрепленных к направляющим 5 и установленных в них подшипников 9 производится регулировка положения губок 6. Планки 3, прикрепленные к кольцу 2,

вращаются вокруг основания 1, что обеспечивает преобразование вращательного движения в поступательное, посредством соприкосновения планок 3 и подшипников 9. При вращении планок 3, происходит движение губок 6 навстречу друг к другу, которые деформируют образец. Далее губки 6 возвращают в исходное положение, происходит замена губок 6 и операции повторяются до придания образцу формы готового изделия (профильной трубы). При этом осуществляется запись изменения давления металла на губки P в зависимости от величины хода L направляющей 5.

Узел деформирования выполнен в виде сменных губок 6 с разными рабочими калибрами, форма которых соответствует форме калибров роликовой оснастки по переходам. Следовательно, выполнение соответствующих калибров на губках 6 позволяет определить энергосиловые параметры процесса по переходам.

Работу деформации определяем по следующей формуле:

$$A = \int_0^{\Delta_{max}} P_d(\Delta) \cdot d(\Delta) \qquad (1)$$

где A – робота деформации при обработке металлов давлением;

$P_d(\Delta)$ – функция описывающая кривую изменения давления металла на губки в зависимости от величины хода Δ;

Δmax – максимальное перемещение направляющей, мм.

Крутящий момент $\mathrm{M_{кр}}$, возникающий при обработке металлов давлением на губках от хода направляющей $L(\Delta)$, вычисляем по следующей формуле

$$\mathrm{M_{кр}} = P_d(\Delta) \cdot \cos(\propto(\Delta)) \cdot L(\Delta) \qquad (2)$$

где $\mathrm{M_{кр}}$ – крутящий момент возникающий при обработке металлов давлением;

$\propto(\Delta)$ – угол поворота планок 3;

$L(\Delta)$ – кратчайшее расстояние от центра образца 7 к точке соприкосновения планок 3 и подшипников 9.

На рис. 3 показана кинематика сопряжения формующих элементов (губок).

Расстояние $L(\Delta)$ зависит от величины осадки Δ, и определяется по следующей зависимости:

$$L(\Delta) = \sqrt{\left(\frac{d}{2} + R_1 - \frac{\Delta}{2}\right)^2 + r^2 + \frac{R_2 \cdot r \cdot (d + 2R_1 - \Delta)}{\frac{d}{2} + R_1 - \frac{\Delta}{2} + \frac{r \cdot (\frac{d}{2} + R_1 - \frac{\Delta}{2})}{R_2 - r}}} \qquad (3)$$

где R_1 – расстояние от соприкосновения губок 6 с образцом (трубной заготовкой) до оси подшипника 9;

R_2 – расстояние перпендикулярное от планки 3 до оси вращения устройства;

d – диаметр трубной заготовки;

Δ – величина осадки.

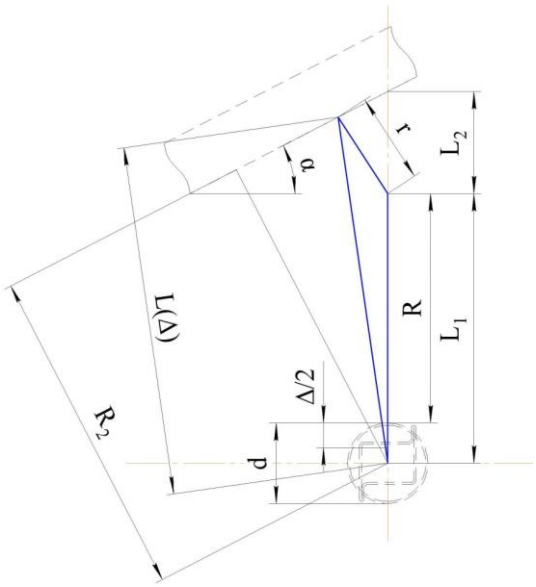


Рис. 3 – Кинематика сопряжения формующих элементов (губок).

Результаты исследований. Разработанное устройство обеспечивает получение необходимых экспериментальных данных для анализа и оптимизации процесса формообразования, проектирования и изготовления роликовой оснастки.

Выводы. Разработанное устройство позволяет определить энергосиловые параметры процесса формообразования профильных труб.

Применение предложенного устройства позволяет на стадии проектирования технологической оснастки оценить основные технологические параметры формовки, уточнить прочностные характеристики проектируемого технологического оборудования, что в свою очередь приводит к снижению материальных и физических затрат связанных с определением исходных данных по стадиям исследуемых процессов и изготовлением роликовой оснастки.

Список литературы: 1. Отечественные трубы вытесняют импорт. – [электронный ресурс], URL : http://www.ukrrudprom.ua (дата обращения 07.10.2012). **2.** Анализ рынка электросварных труб Украины. 2013 год. – [электронный ресурс], URL: http://pro-consulting.ua (дата обращения 04.12.2013). **3.** *Плеснецов Ю. А.* Анализ современного состояния производства и применения профильных труб / Ю. А. Плеснецов, А. С. Забара // Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка]. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво . – 2013. – Вип. 2. **4.** *Тришевский И. С.* Теоретические основы процесса профилирования / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов. М. : Металлургия, 1980. 287 с.

Bibliography (transliterated): 1. Otechestvennihe trubih vihtesnyayut import. – [ehlektronnihyj resurs], URL: http:www.ukrrudprom.ua (data obratheniya 07.10.2012). **2.** Analiz rihnka ehlektrosvarnihkh trub Ukrainih. 2013 god. – [ehlektronnihyj resurs], URL : http:pro–consulting.ua (data obratheniya 04.12.2013).

3. Plesnecov Yu. A. Analiz sovremennogo sostoyaniya proizvodstva i primeneniya profiljnihkh trub Yu. A. Plesnecov, A. S. Zabara Zbirnik naukovikh pracj [Poltavsjkogo nacionaljnogo tekhnichnogo universitetu im. Yu. Kondratyuka]. Ser. Galuzeve mashinobuduvannya, budivnictvo. – 2013. – Vip. 2.
4. Trishevskiyj I.S. Teoreticheskie osnovih processa profilirovaniya I.S. Trishevskiyj, M.E. Doktorov. Moscow: Metallurgiya, 1980. 287 p.

Поступила (received) 29.10.2014

УДК 621.981:669.14

В. Г. ЗАГОРЯНСКИЙ, канд. техн. наук, доц.,
КрНУ им. М. Остроградского, Кременчуг

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАГРЕВА НА УПРУГОЕ ПРУЖИНЕНИЕ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ЛИСТОВ

Статья посвящена теоретическому анализу и экспериментальному исследованию влияния нагрева при гибке двухслойных листов на их упругое пружинение. Получены расчетные зависимости для определения пружинения при нагреве двухслойных листов (полос) при гибке. Для двухслойных листов коррозионностойкого биметалла 09Г2С + 12Х18Н10Т установлены зависимости угла пружинения от температуры нагрева двухслойных листов под гибку плакирующим слоем наружу и внутрь и определены оптимальные температуры нагрева.

Ключевые слова: пластический изгиб, двухслойный лист, изгибающий момент, упругое пружинение, влияние нагрева.

Введение. Процессы обработки давлением двухслойных сталей и других биметаллов, в связи с их физико-механическими особенностями, имеют существенные отличия от соответствующих процессов обработки монометаллов.

Основным методом изготовления деталей в нефтяном и химическом аппаратостроении является гибка листового проката.

Гибка цилиндрических и конических обечаек и секторов на универсальных листогибочных машинах выполняется в горячем и холодном состоянии. Гибка толстых листов выполняется в горячем состоянии. Технология гибки на таких машинах особенно распространена в химическом и нефтяном машиностроении, в котло– и судостроении, то есть в тех отраслях, где широко применяются двухслойные коррозионностойкие листы, в том числе и толстые, и другие биметаллы.

Анализ последних исследований и литературы. Известно [1], что расчет пружинения материала, анализ точности формообразования являются одними из главных задач при исследовании процессов пластического изгиба.

Анализ литературных источников по данной проблеме показал, что вопросы теоретического анализа упругого пружинения при гибке листов из

© В. Г. Загорянский, 2014

двухслойных сталей и других биметаллов, и получения соответствующих расчетных зависимостей для определения технологических параметров при гибке освещены недостаточно как в отечественных публикациях [2], так и в зарубежных изданиях, посвященных как технологиям плакирования [3], так и технологиям обработки металлов давлением, в том числе гибке [4, 5].

Следует отметить, что вопросу влияния нагрева под гибку на величину пружинения двухслойных коррозионностойких листов и других биметаллов в основополагающих в аспекте обработки давлением двухслойных сталей и других биметаллов работах Шевелкина Б.Н. с сотрудниками [6], а также в последующих работах других исследователей не уделялось достаточного внимания.

Цель исследования, постановка проблемы. Ставились задачи разработки расчетных зависимостей для определения упругого пружинения двухслойных листов при гибке с учетом нагрева, а также экспериментального исследования влияния нагрева под гибку на угол пружинения двухслойных листов.

Материалы исследований. Пластический изгиб двухслойного листа или широкой полосы (по аналогии со случаями изгиба монометаллического листа или полосы, а также биметаллического бруса [2]) будет сопровождаться упругими деформациями, в результате чего будет иметь место упругое пружинение.

Упругое пружинение, возникающее после снятия деформирующей нагрузки, характеризуется величиной угла $\Delta\alpha$, °, который зависит от соотношения механических свойств плакирующего и основного слоев, от соотношения их толщин и от того, и растянутой пли сжатой зоне гиба находится плакирующий слой [2].

За величину пружинений обычно принимают возникающую от действия обратного изгибающего момента упругую деформацию.

Рассмотрим влияние температуры нагрева на упругое пружинение двухслойных листов (полос) при гибке.

Деформационное упрочнение, вызванное затрудненностью перемещения дислокаций в материале, характеризует модуль деформационного упрочнения $D_c = \partial\sigma/\partial\varepsilon$ – производная напряжения по деформации, изменение которого определяет геометрию диаграммы деформации. Модуль деформационного упрочнения уменьшается с повышением температуры, при которой происходит деформирование [1].

Принимаем, в соответствии с [1], что влияние упрочнения при гибке аппроксимируется степенной функцией $\sigma = A\varepsilon^n$, где A – коэффициент,

характеризующий механические свойства металла; n – коэффициент, характеризующий степень упрочнения металла. Известно также [1], что характер этой зависимости сохраняется при повышении температуры нагрева листа (полосы) при гибке.

С повышением температуры коэффициент A, так же, как и коэффициент n, уменьшается, что следует из уменьшения, с повышением температуры, пределов текучести и прочности металла.

Данную закономерность иллюстрирует табл., в которой приведены значения коэффициентов A и n и модуля упругости E в зависимости от температуры нагрева под гибку для некоторых сталей, наиболее широко используемых в производстве двухслойных коррозионностойких листов [7–9].

Таблица. Константы кривой упрочнения и модуль упругости некоторых сталей в зависимости от температуры [7–9]

Сталь	Константы кривой упрочнения и модуль упругости	Температура, °С			
		20	400	600	800
Сталь 3	A, МПа	477	222,6	163,5	64,8
	n	0,141	0,03	0,039	0,037
	v	0,0057	0,0037	0,0035	0,0017
	$E\cdot10^{-5}$, МПа	2,1	1,73	1,35	1,1
09Г2С	A	545	559	293	
	n	0,098	0,175	0,116	
	v	0,007	0,0066	0,0037	
	$E\cdot10^{-5}$, МПа	2,1	1,75	1,5	
08Х13	A, МПа	555	499,7	184	85,2
	n	0,146	0,093	0,924	0,033
	v	0,0067	0,0057	0,0032	0,0016
	$E\cdot10^{-5}$, МПа	2,1	1,93	1,7	1,5
12Х18Н10Т	A, МПа	670	567	466	393
	n	0,2	0,1494	0,179	0,165
	v	0,0071	0,0065	0,0055	0,0046
	$E\cdot10^{-5}$, МПа	2,02	1,77	1,6	1,5

Влияние температуры нагрева на пружинение при гибке можно представить отношением величины изменения кривизны вследствие пружинения при данной температуре нагрева к тому же параметру при комнатной температуре [1]. То есть, если мы хотим уменьшить пружинение за счет нагрева, нам нужно, при постоянном значении величины изменения кривизны при комнатной температуре, уменьшать, путем повышения температуры и нахождения оптимальной, величину изменения кривизны при данной температуре.

В работе [8] приведены зависимости для определения радиусов изгиба листа с учетом нагрева:

– до пружинения $R_г$

$$R_г = \frac{R_{ост}}{1+\nu^{T}\left(\frac{R_{ост}}{\delta}\right)^{1-n^{T}}}, \quad (1)$$

– и остаточного радиуса $R_{ост}$

$$R_{ост} = \frac{R_г}{1-\nu^{T}\left(\frac{R_г}{\delta}\right)^{1-n^{T}}}, \quad (2)$$

где ν^{T} – коэффициент, зависящий от механических свойств материала (табл. 1) [8].

В соответствии с теоремой о разгрузке [10], связь между напряжениями и деформациями при разгрузке подчиняется закону Гука, то есть разгрузка происходит в условиях упругого деформирования, откуда кривизна пружинения, возникающая при разгрузке [11]

$$\kappa' = \frac{1}{R_{пр}} = \frac{M}{EJ}, \quad (3)$$

где $R_{пр}$ – радиус кривизны изгибаемого листа при пружинении (или, по терминологии [10], изменение кривизны при разгрузке $1/\rho_{разгр}$); E – модуль упругости при комнатной температуре (табл. 1 [8]); J – момент инерции площади поперечного сечения прямоугольной полосы относительно нейтральной поверхности.

Зная, что момент M при пластическом изгибе элемента, имеющего в поперечном сечении прямоугольную форму, можно представить в виде [1]

$$M = 2bR_{пр}^{2}S_{\sigma-\varepsilon}, \quad (4)$$

где $S_{\sigma-\varepsilon}$ – статический момент относительно оси σ площади диаграммы σ–ε, ограниченной деформацией крайнего волокна ε_δ, где δ – толщина листа, определяемый по формуле

$$S_{\sigma-\varepsilon} = \int_0^{\varepsilon_\delta} \sigma\varepsilon d\varepsilon. \quad (5)$$

Откуда

$$\kappa' = \frac{2bR_{пр}^{2}S_{\sigma-\varepsilon}}{EJ}. \quad (6)$$

Таким образом, отношение величины изменения кривизны вследствие пружинения при данной температуре нагрева κ_T' к тому же параметру при комнатной температуре κ' можно представить в виде

$$\frac{\kappa_T'}{\kappa'} = \frac{S_{\sigma-\varepsilon\ T}}{S_{\sigma-\varepsilon}} \frac{E}{E_T}, \tag{7}$$

где $S_{\sigma\text{-}\varepsilon T}$ – статический момент при температуре нагрева T, E_T – модуль упругости при температуре нагрева T.

Подставляя в зависимость (5) выражение для аппроксимирующей кривой упрочения, получаем для комнатной температуры (постоянной интегрирования C для упрощения пренебрегаем)

$$S_{\sigma-\varepsilon} = \int_0^{\delta} \sigma\varepsilon d\varepsilon = \int_0^{\delta} \varepsilon A\varepsilon^n d\varepsilon = \int_0^{\varepsilon_\delta} A\varepsilon^{n+1} d\varepsilon = \frac{A}{n+2}\varepsilon_\delta^{n+2}, \tag{8}$$

для температуры T, соответственно

$$S_{\sigma-\varepsilon\,\mathrm{T}} = \frac{A^{\mathrm{T}}}{n^{\mathrm{T}}+2}\varepsilon_\delta^{n^T+2}, \tag{9}$$

Откуда

$$\frac{\kappa_T'}{\kappa'} = \frac{S_{\sigma-\varepsilon\ T}}{S_{\sigma-\varepsilon}} \frac{E}{E_T} = \frac{A^{\mathrm{T}}\varepsilon_\delta^{n^{\mathrm{T}}+2}}{n^{\mathrm{T}}+2} \cdot \frac{n+2}{A\varepsilon_\delta^{n+2}} = \frac{A^{\mathrm{T}}}{A} \cdot \frac{n+2}{n^T+2} \cdot \varepsilon_\delta^{n^T-n} \cdot \frac{E}{E_T}, \tag{10}$$

Методика определения констант A и n кривой упрочнения для двухслойных листов приведена в работе [2].

Отметим, что в общем случае относительная деформация данного слоя изгибаемого листа определяется по зависимости [2]

$$\varepsilon = \frac{\rho - \rho_\sigma}{\rho}, \tag{11}$$

где ρ – текущий радиус; ρ_σ – радиус нейтрального слоя при изгибе.

При гибке с большими радиусами закруглений определяется не угол пружинения, а упругое изменение радиуса после гибки. Остаточная деформация крайних волокон определяется по приближенной формуле [12]

$$\varepsilon_\delta = \frac{1}{\frac{2r}{\delta}+1} \tag{12}$$

Отметим, что свойства биметалла (в данном случае, двухслойного металла) можно прогнозировать на основе известных свойств его составляющих (на основе правила смесей [13]).

Величина модуля упругости для двухслойного листа может быть определена по зависимости [13]:

$$E_{12} = \frac{E_2\left[1 - a\left(\left(1 - \frac{E_1}{E_2}\frac{1-\mu_2}{1-\mu_1}\right)\right)\right]}{1-\mu_2 a(1-m)}, \quad (13)$$

где E_1 и E_2 – модули упругости металлов компонентов (плакирующего и основного соответственно); $a = \delta_{01}/\delta_0$ – отношение исходной толщины одного из компонентов к исходной толщине всей композиции; μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона металлов компонентов; Коэффициент m равен [13]

$$m = \frac{\mu_1}{\mu_2}\cdot\frac{1-\mu_2}{1-\mu_1}. \quad (14)$$

Очевидно, что по зависимости (13) аналогично определяется модуль упругости для двухслойного листа и при данной температуре нагрева T. Значения модуля упругости E в зависимости от температуры T приведены в табл. Зная изменение модуля упругости второго рода G данного металла в зависимости от температуры T [9], и используя зависимость

$$G = \frac{E}{2(1-\mu)}, \quad (15)$$

можно определить коэффициент Пуассона этого металла для данной температуры Т.

Зависимость угла пружинения от температуры нагрева двухслойных листов под гибку исследовалась на примере полученных прокаткой двухслойных листов коррозионностойкого биметалла 09Г2С + 12Х18Н10Т.

Отметим, что данное сочетание весьма интересно и перспективно, так как позволяет использовать повышенную прочность стали основного слоя и коррозионную стойкость стали плакирующего слоя. Назначение стали 09Г2С – различные детали и элементы сварных металлоконструкций, аппараты и сосуды химической промышленности, к которым предъявляются требования повышенной прочности и работающие при температуре от -70 ...+425°С под давлением [9].

Толщина двухслойных листов составляла 10 мм, толщина плакирующего слоя, в соответствии с ГОСТ 10885-85 Сталь листовая горячекатаная

двухслойная коррозионностойкая. Технические условия, составляла 2,5 мм (нормальная толщина). Отношение толщины плакирующего слоя к толщине двухслойного листа $a = \delta_1/\delta = 0{,}25$. Выполнялась гибка на внутренний радиус 80 мм, то есть относительный радиус гиба $\frac{r}{\delta} = 8$.

Проводился нагрев под гибку в диапазоне от комнатной температуры до 400 °С, с интервалом 50 °С.

Гибка двухслойных листов выполнялась как плакирующим слоем наружу, так и плакирующим слоем внутрь.

Результаты измерения углов пружинения приведены на рис.

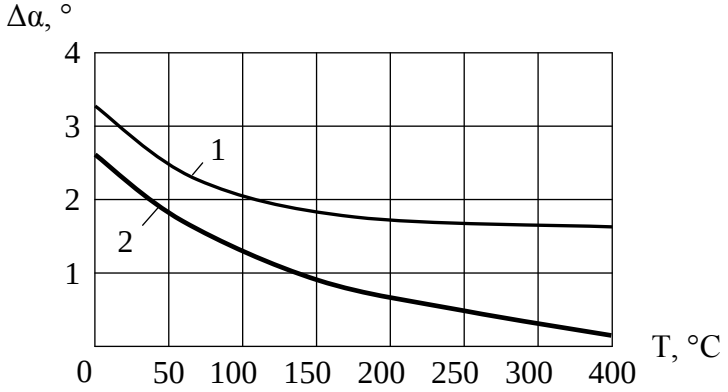


Рис. – Влияние температуры гибки листового биметалла 09Г2С + 12Х18Н10Т на угол пружинения: 1 – гибка плакирующим слоем наружу; 2 – гибка плакирующим слоем внутрь

Из рис. следует, что угол пружинения коррозионностойкого биметалла 09Г2С + 12Х18Н10Т в процессе пластического изгиба зависит (при прочих равных условиях) от того, наружу или внутрь плакирующим слоем выполняется гибка. При гибке плакирующим слоем внутрь пружинение практически незаметно при нагреве листа до 400°С, при гибке плакирующим слоем наружу свести практически до нуля угол пружинения повышением температуры не удается.

Выводы. 1. Установлено, что упругое пружинение при нагреве будет меньше, чем пружинение при изгибе в холодном состоянии. Разработаны расчетные зависимости, показывающие, что разница будет увеличиваться с увеличением кривизны изгибаемого листа (полосы) и температуры нагрева.

2. Для коррозионностойкого биметалла 09Г2С + 12Х18Н10Т в процессе пластического изгиба угол пружинения зависит (при прочих равных условиях) от того, наружу или внутрь плакирующим слоем выполняется гибка (на всем диапазоне температур, при которых выполнялась гибка, – от комнатной до +400 °С, угол пружинения больше при гибке плакирующим слоем наружу). Оптимальной температурой гибки в этом диапазоне при гибке плакирующим

слоем внутрь является 400°С, при гибке плакирующим слоем наружу при этой температуре угол пружинения минимален ($\Delta\alpha \approx 2°$).

Список литературы: 1. *Лысов М.И.* Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / М.И. Лысов. – М.: Машиностроение, 1966. – 236 с. **2**. *Чечета И.А.* О некоторых особенностях технологии пластического изгиба биметалла / И.А. Чечета // Кузнечно-штамповочное производство. – 1960. – № 12. – С. 11-13. **3**. CASTI Handbook of Cladding Technology / Liane M. Smith, Mario Celant. – Edmonton: CASTI Publishing Inc., 2000. – 267 p. **4**. Metal Forming Practise: Processes – Machines – Tools / Tschätsch H., Koth A. – Berlin: Springer-Verlag, 2006. – 415 p. **5**. *Altan T.* Metal Forming Handbook. – Berlin: Springer-Verlag, 1998. – 573 p. **6**. *Шевелкин Б.Н.* Обработка давлением листовой двухслойной стали / Б.Н. Шевелкин, А.П. Голованова // Прогрессивная технология в химическом машиностроении. Труды НИИХиммаша. – Вып. 19. – 1956. – С. 47–67. **7**. *Берлинер Ю.И.* Гибка толстых листов и правка обечаек в горячем состоянии / Ю.И. Берлинер. – Химическое и нефтяное машиностроение. – 1971. – № 4. – С. 27-29. **8**. *Берлинер Ю.И.* Технология химического и нефтяного машиностроения / Ю.И. Берлинер, Ю.А. Балашов. – М.: Машностроение, 1976. – 256 с. **9**. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с. **10**. *Зубцов М.Е.* Листовая штамповка / М.Е. Зубцов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с. **11**. *Мошнин Е.Н.* Гибка и правка на ротационных машинах. Технология и оборудование / Е.Н. Мошнин. – М.: Машиностроение, 1967. – 272 с. **12**. *Романовский В.П.* Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с. **13**. Биметаллы / Л.Н. Дмитров, Е.В. Кузнецов, А.Г. Кобелев [и др.]. – Пермское книжное изд., 1991. – 415 с.

Bibliography (transliterated): 1. Lysov M.I. Teoriya i raschet prozessov izgotovleniya detaley metodami gibki M.I. Lysov. – Moscow: Mashinostroenie, 1966. – 236 P. 2. Checheta I.A. O nekotorych osobennostyach technologii plasticheskogo izgiba bimetalla I.A. Checheta Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. – 1960. – No 12. – P. 11-13. **3.** CASTI Handbook of Cladding Technology Liane M. Smith, Mario Celant. – Edmonton: CASTI Publishing Inc., 2000. – 267 p. **4.** Metal Forming Practise: Processes – Machines – Tools Tschatsch H., Koth A. – Berlin: Springer-Verlag, 2006. – 415 p. **5.** Altan T. Metal Forming Handbook. – Berlin: Springer-Verlag, 1998. – 573 r. **6.** Shevelkin B.N. Obrabotka davleniem listovoy dvuchsloynoy stali B.N. Shevelkin, A.P. Golovanova Progressivnaya technologiya v chimicheskom mashinostroenii. Trudy NIIChimmasha. – Vyp. 19. – 1956. – P. 47–67. **7.** Berliner Yu.I. Gibka tolstych listov i pravka obechaek v goryachem sostoyanii Yu.I. Berliner. – Chimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie. – 1971. – No 4. – P. 27-29. **8.** Berliner Yu.I. Technologiya chimicheskogo i neftyanogo mashinostroeniya Yu.I. Berliner, Yu.A. Balashov. – Moscow: Mashnostroenie, 1976. – 256 P. **9.** Marochnik staley i splavov V.G. Sorokin, A.V. Volosnikova, P.A. Vyatkin i dr.; Pod obsch. red. V.G. Sorokina. – Moscow: Mashinostroenie, 1989. – 640 P. **10.** Zubzov M.E. Listovaya shtampovka M.E. Zubzov. – Leningrad: Mashinostroenie, 1980. – 432 P. **11.** Moshnin E.N. Gibka i pravka na rotazionnych mashinach. Technologiya i oborudovanie E.N. Moshnin. – Moscow: Mashinostroenie, 1967. – 272 P. **12.** Romanovskiy V.P. Spravochnik po cholodnoy shtampovke V.P. Romanovskiy. – Leningrad: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1979. – 520 P. **13.** Bimetally L.N. Dmitrov, E.V. Kuznezov, A.G. Kobelev [i dr.]. – Permskoe knizhnoe izd., 1991. – 415 P.

Поступила (received) 29.10.2014

УДК 621.983

О. В. КАЛЮЖНИЙ, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ»;
А. С. ПАХОЛКО, аспірант НТУУ «КПІ», Київ

СИЛОВІ РЕЖИМИ ТА ФОРМОЗМІНА МЕТАЛУ ПРИ ВІДБОРТУВАННІ ОТВОРІВ У ПОПЕРЕДНЬО ЗПРОФІЛЬОВАНІЙ ЗАГОТОВЦІ В МАТРИЦІ З РІЗНИМ РАДІУСОМ ЗАОКРУГЛЕННЯ

Приведені результати розрахунків методом скінченних елементів холодного відбортування отворів сферичним пуансоном у попередньо зпрофільованій заготовці із маловуглецевої сталі та алюмінію. Встановлено вплив радіусу заокруглення матриці на зусилля відбортування, форму і розміри здеформованих заготовок та напружено-деформований стан в них. Розрахований ступінь використання ресурсу пластичності здеформованого металу. Збільшення радіусу заокруглення матриці приводить до зменшення зусилля деформування та зростання висоти відбортованої частини заготовки. Моделюванням отримані необхідні розрахункові дані, які підтверджені експериментально.

Ключові слова: відбортування отворів, зпрофільована заготовка, радіус заокруглення матриці, сферичний пуансон пуансон, метод скінченних елементів, зусилля відбортування, форма і розміри, напружено-деформований стан заготовок.

Вступ. Відбортування отворів у традиційній листовій заготовці, яка має постійну товщину, приводить до потоншення та викривлення здеформованої частини заготовки. В джерелі [1] приведені експериментальні дані по впливу відносної товщини заготовки та методу утворення круглого отвору, який виконаний обробкою різанням або вирубуванням в штампі, на коефіцієнт відбортування при формоутворенні сферичним та циліндричним пуансоном. В роботах [2, 3] наведені дані по впливу геометричної форми пуансону на зусилля деформування та форму відбортованої частини заготовки, а також експериментальні дані по коефіцієнту відбортування при різних значеннях відносної товщини заготовки із маловуглецевої сталі. Експериментальні значення граничних коефіцієнтів відбортування круглих отворів у заготовках з нержавіючих сталей та алюмінієвих сплавів приведені в джерелі [4]. Для отримання відбортуванням здеформованих частин з постійною товщиною стінки використовують попередньо зпрофільовану заготовку [5]. В такій заготовці отвір утворюють видавлюванням з подальшим пробиванням перемички. При видавлюванні відбувається потовщення частини заготовки, яка потім підлягає відбортуванню. Проведені дослідження показали можливість отримання відбортуванням рівної по довжині циліндричної частини відбортованої заготовки з постійною товщиною стінки, яка дорівнює товщині листової заготовки [6]. Вплив геометричної форми пуансону на відбортування круглих отворів у попередньо зпрофільованій заготовці встановлений в роботі [7]. Однак, залишаються невирішені задачі виявлення впливу радіусу

© О. В. Калюжний, А. С. Пахолко, 2014

заокруглення матриці на силові режими формоутворення, форму та розміри здеформованих заготовок, напружено-деформований стан в них та ступінь використання ресурсу пластичності здеформованого металу. Вказані задачі можна успішно вирішити шляхом створення математичних моделей та проведення розрахункового аналізу з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) [6,7].

Мета роботи . Постановка задачі досліджень. Метою роботи є вивчення впливу радіусу заокруглення матриці на силові режими формоутворення, форму і розміри та напружено-деформований стан здеформованих заготовок при відбортуванні отворів у попередньо зпрофільованих заготовках.

Розрахункова схема для моделювання МСЕ з використанням програми DEFORM з позначеннями для аналізу відбортування отворів в зпрофільованій заготовці сферичним пуансоном показана на рис. 1. Задача вісесиметрична, наведені позначення на половині заготовки та деформуючого інструменту. Заготовка 1 з попередньо виконаним отвором радіусом $R_{\text{о}}$ і товщиною профілю $S_{\text{п}}$ біля отвору встановлена на матриці 2, яка має отвір радіусом $R_{\text{м}}$ та радіус заокруглення $r_{\text{м}}$. Заготовка 1 зафіксована притискачем 3. Кут α профілю встановлювався таким чином, щоб забезпечити рівний торець відбортованої частини. Відбортування виконується пуансоном 4, що має сферичну і циліндричну частини радіусом $R_{\text{п}}$. Використані заготовки з маловуглецевої сталі, яка була відпалена після профілювання видавлюванням, з наступними розмірами: діаметр заготовки $D_{\text{з}}$=220 мм, товщина $S_{\text{о}}$=3 мм, діаметр отвору $D_{\text{о}}$ =27 мм, висота профілю біля отвору $S_{\text{п}}$=4,8 мм, радіус профілю $R_{\text{пр}}$ вибирався в залежності від радіусу заокруглення матриці $r_{м}$. Діаметр отвору матриці $D_{\text{м}}$ =2 $R_{\text{м}}$=70 мм. Діаметр циліндричної частини пуансону $D_{\text{п}}$=64 мм, радіус сфери $R_{\text{п}}$=32 мм. Використані величини радіусу заокруглення матриці $r_{\text{м}}$=4, 6, 8, 10, 12 та 14 мм. При цьому, радіус профілю заготовки відповідно дорівнював $R_{\text{пр}}$ =21; 21,7; 22,4; 23; 23,9 та 24,6 мм. Коефіцієнт відбортування для наведених розмірів заготовки та пуансону склав k=0,4.

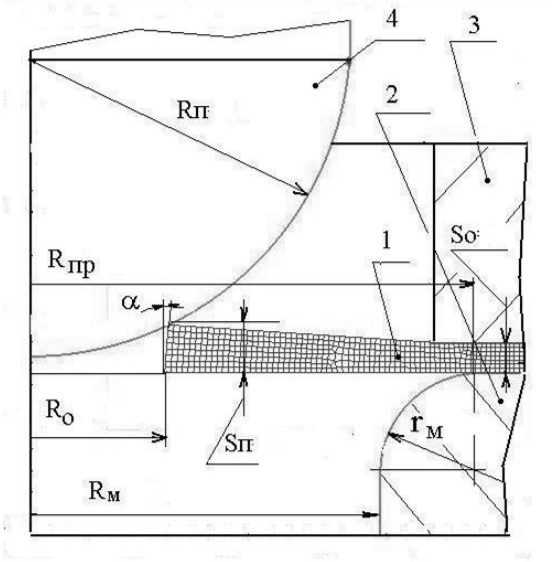


Рис. 1 – Розрахункова схема відбортування зпрофільованої заготовки

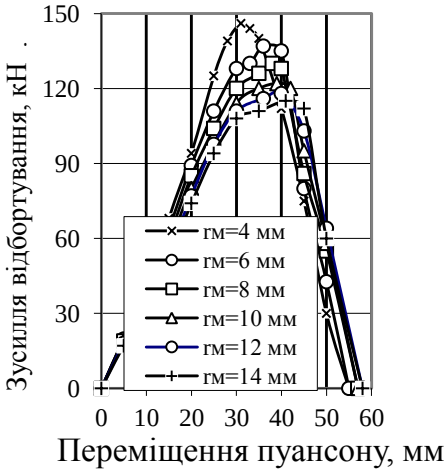
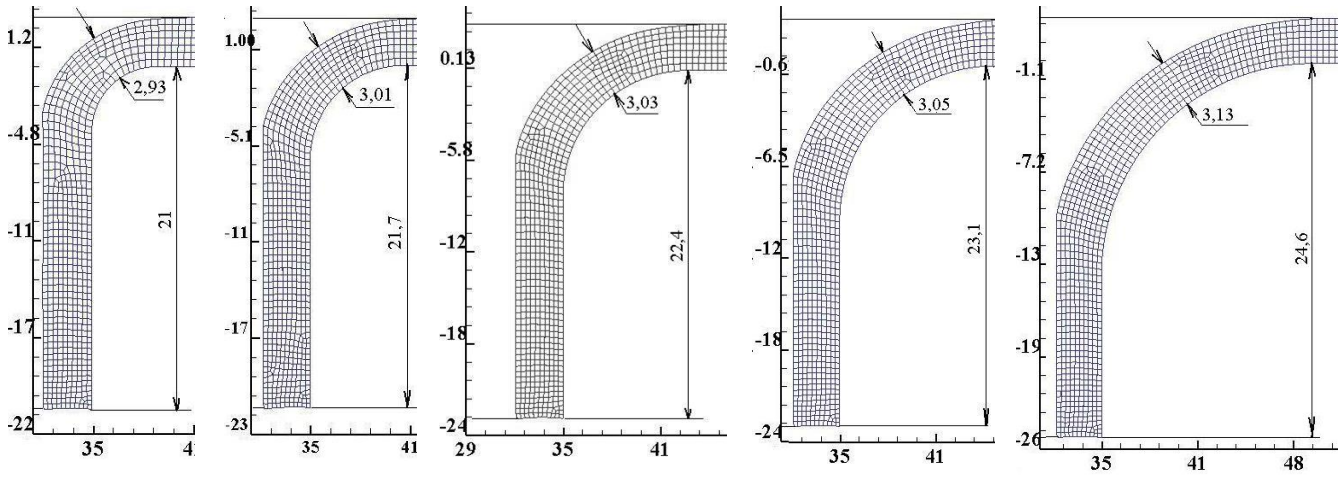


Рис. 2 – Залежність зусилля відбортування від переміщення пуансону

На рис. 2 приведені залежності зусилля відбортування від переміщення пуансону, які отримані при відбортуванні в матрицях з різним радіусом $r_м$. Зі збільшення величини $r_м$ зусилля відбортування зменшується. При цьому, досягнення максимуму зусилля відбортування зміщується в сторону кінцевої стадії відбортування. Інтенсивне зниження зусилля має місце при зростанні радіусу $r_м$ з 4 до 10 мм. Подальше збільшення радіусу несуттєво впливає на величину зусилля. Для радіусу $r_м$=4 мм максимальна величина зусилля складає 146 кН, для $r_м$=10 мм – 122 кН, а для $r_м$=14 мм – 115 кН.

Величина радіусу заокруглення $r_м$ впливає на форму та розміри здеформованої заготовки, які зображені на рис. 3. Найбільше потоншення стінки на радіусі заокруглення матриці відбувається при $r_м$=4 мм, при цьому товщина стінки по середині радіусу заокруглення матриці досягає величини 2,93 мм.

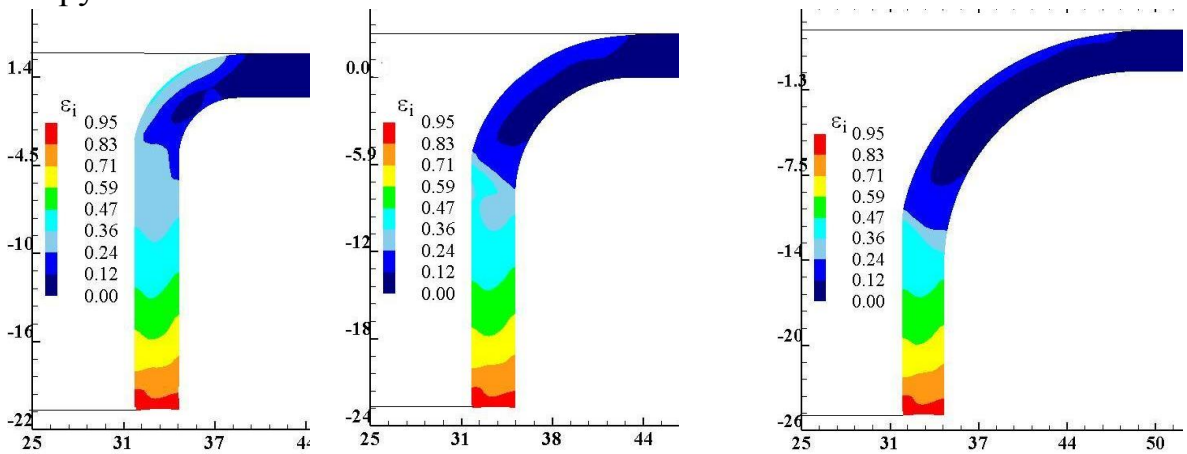
Відбортування в матриці з $r_м$=6 мм забезпечує практично однакову товщину стінки по всій довжині здеформованої частини заготовки. Подальше збільшення радіусу $r_м$ приводить до зменшення потоншення зпрофільованої частини вихідної заготовки. При вищевказаних розмірах профілю товщина стінки після відбортування в матриці з $r_м$=14 мм складає 3,13 мм. Також при збільшені радіусу $r_м$ зростає довжина відбортованої частини заготовки. Так, для $r_м$=4 мм довжина має величину 21 мм, а для $r_м$=14 мм – 24,6 мм. Це пов’язано зі зменшення потоншення профілю заготовки при формоутворенні зі збільшенням радіусу $r_м$.



$r_{\text{М}}$ =4 мм $r_{\text{М}}$ =6 мм $r_{\text{М}}$ =8 мм $r_{\text{М}}$ =10 мм $r_{\text{М}}$ =14 мм

Рис. 3– Форма та розміри в міліметрах здеформованих частин заготовок після відбортування в матриці з різним радіусом $r_{\text{М}}$

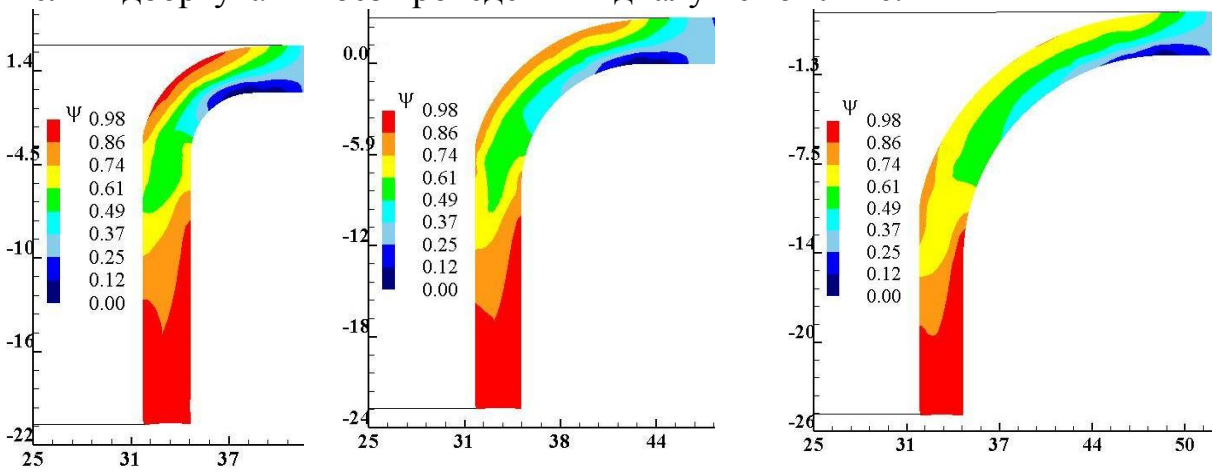
Радіус заокруглення матриці $r_{\text{М}}$ впливає на пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією по довжині відбортованих частин заготовок. На рис. 4 наведені розподіли інтенсивності деформацій ε_i в здеформованих заготовках після відбортування в матрицях з $r_{\text{М}}$=4, 8 та 14 мм. Найбільші значення ε_i=0,83–0,95 зосереджені в зоні торців стінок з подальшим зменшенням до місця переходу циліндричної області в радіус заокруглення. Після відбортування в матриці з $r_{\text{М}}$=4 мм у внутрішніх шарах металу стінки на радіусі заокруглення досягається величина ε_i=0,24–0,36. В інших наведених випадках отримано ε_i=0,12–0,24. Тому в здеформованому металі в матриці з $r_{\text{М}}$ =4 мм можна прогнозувати збільшені механічні властивості в стінці на радіусі заокруглення.



$r_{\text{М}}$ =4 мм $r_{\text{М}}$ =8 мм $r_{\text{М}}$ =14 мм

Рис. 4 – Розподіли інтенсивності деформацій ε_i в здеформованих частинах заготовок після відбортування в матриці з різним радіусом заокруглення $r_{\text{М}}$. Розміри по вісях в міліметрах

Можливість подальшого потоншення стінок після відбортування в матрицях з різним радіусом $r_м$ можна визначити по розподілу ступеню використання ресурсу пластичності ψ здеформованого металу, розподіли якого по об'єму здеформованих заготовок приведені на рис. 5. На внутрішніх шарах металу стінки на радіусі заокруглення величини ψ різні. Після відбортування в матриці з $r_м$=4 мм в цьому місці ресурс пластичності практично вичерпується, досягаючи значень ψ=0,86–0,98. Для матриці з $r_м$=8 мм – ψ=0,74–0,86, а для $r_м$=14 мм – ψ=0,61–0,74. В циліндричних областях здеформованих частин заготовок ресурс пластичності здеформованого металу також вичерпується практично повністю: ψ=0,86–0,98. Таким чином, подальше потоншення стінок після відбортування без проведення відпалу неможливе.



$r_м$=4 мм $r_м$=8 мм $r_м$=14 мм

Рис. 5 – Розподіли ступеню використання ресурсу пластичності ψ в здеформованих частинах заготовок після відбортування в матриці з різним радіусом заокруглення $r_м$

Для перевірки адекватності результатів моделювання та порівняння відбортування отворів в заготовці постійної товщини та в зпрофільованій заготовці із пластичного алюмінію ($\sigma_{0,2}$=40 МПа) були проведені чисельні по МСЕ та натурні експерименти. Традиційна листова заготовка мала наступні розміри: товщина S_0=1,5 мм, радіус отвору R_0=10 мм зовнішній радіус $R_з$=50 мм. Поведене моделювання процесу формоутворення отвору видавлюванням пуансоном діаметром 20 мм з кутом конусу торця при вершині 174°. Розміри деформуючого інструменту для відбортування (див. рис. 1): пуансону – радіус $R_п$=20 мм,; матриці – радіуси $R_м$=21,5 мм і $r_м$=6 мм.

Розрахунковим шляхом МСЕ визначені розміри профілю $S_п$=2,15 мм і $R_{пр}$=27 мм, які забезпечили після відбортування постійну товщину стінки (1,5 мм) здеформованої частини заготовки. Тому довжину зпрофільованої частини заготовки можна визначити так: $R_{пр} \approx 0{,}95(R_м + r_м)$. Найбільші

енергосилові витрати мають місце при формоутворенні отвору видавлюванням та отримання потовщення на заготовці. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону приведена на рис. 6. В кінці видавлювання зусилля досягає величини 180 кН. Використання видавлювання при утворенні отвору, в порівнянні з пробиванням або свердлінням, дозволяє економити метал до 75 % на одному отворі. Максимальне зусилля при пробиванні перемички склало 2,7 кН. Форма та розміри здеформованих заготовок після формоутворення отвору та пробивання перемички, які отримані МСЕ, показані на рис. 7.

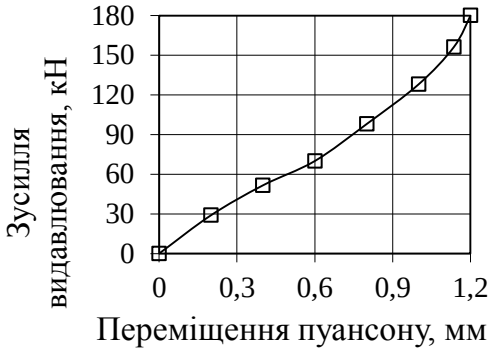


Рис. 6 – Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону

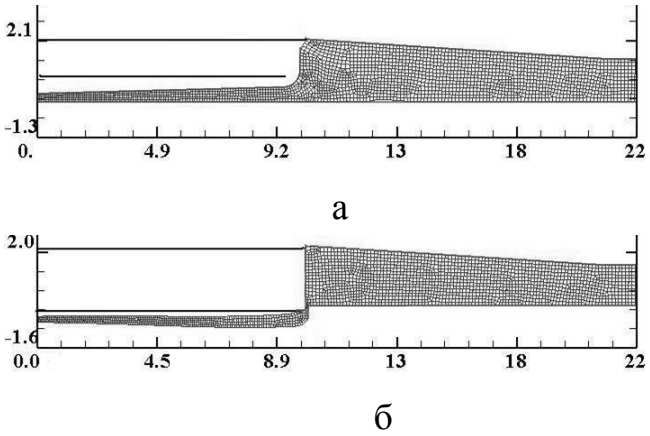


Рис. 7 – Форма та розміри в міліметрах здеформованих частин заготовок: а – після видавлювання, б – після пробивання перемички

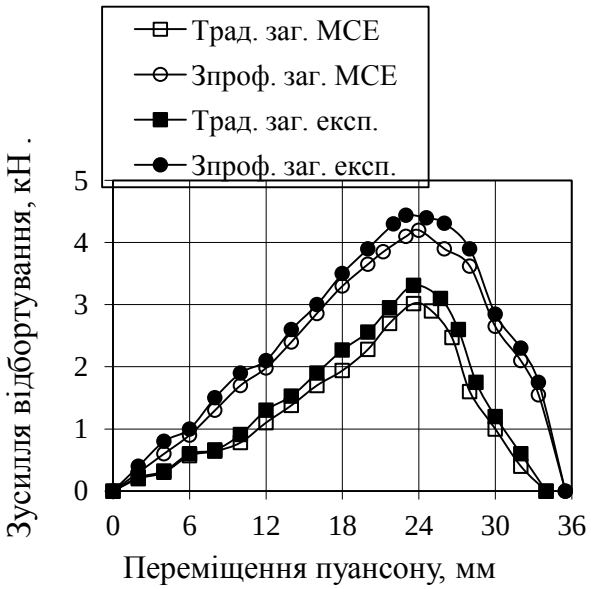
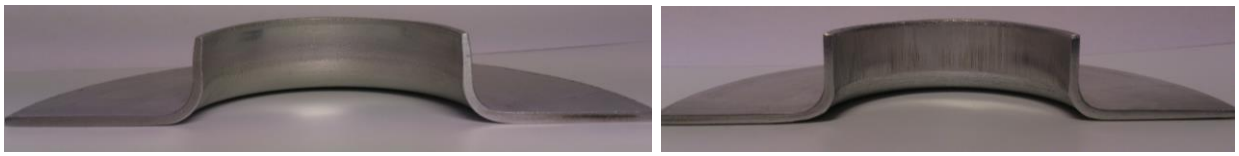


Рис. 8 – Експериментальні та розрахункові залежності зусилля відбортування від переміщення пуансону

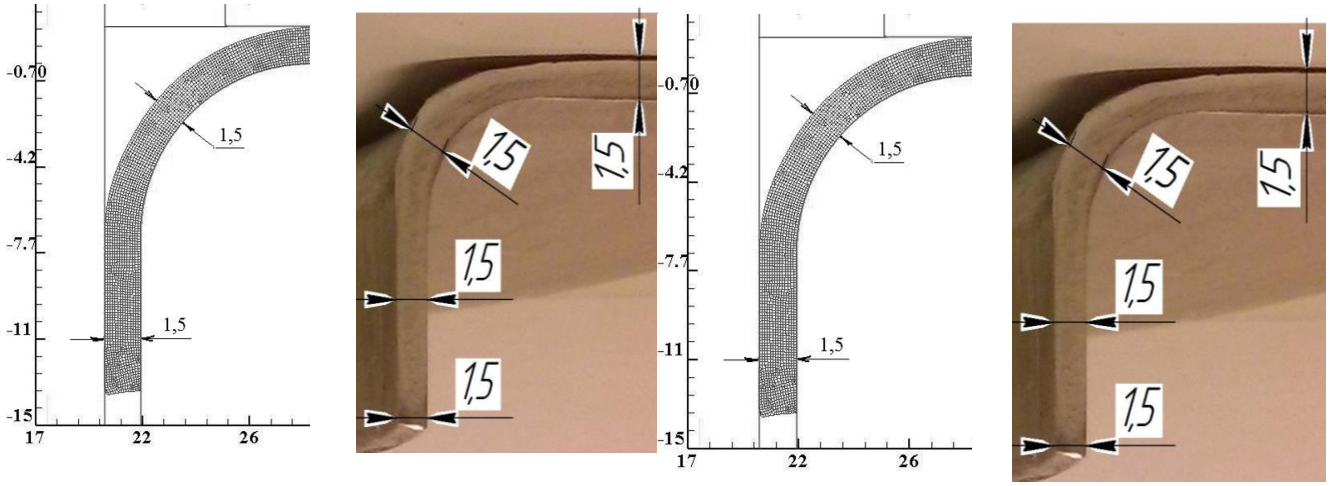
Експериментальні дослідження відбортування традиційної та зпрофільованої заготовки проводилися на випробувальній машині TIRA test

2300. На рис. 8 приведені розрахункові та експериментальні залежності зусилля відбортування від переміщення пуансону. Зусилля відбортування зпрофільованої заготовки більше зусилля відбортування традиційної заготовки, що пов'язано з наявністю потовщення на заготовці та зміцненням металу в ньому, яке отримане при видавлюванні. Максимальна величина зусилля відбортування традиційної заготовки склала 3 кН, зпрофільованої – 4,2 кН. Максимальна відмінність в розрахункових по МСЕ та експериментальних даних досягає 6 %.



а б

Рис. 9 – Здеформовані заготовки в розрізі, які отримані відбортуванням:
а – традиційної заготовки, б – зпрофільованої заготовки



а б

Рис. 10 – Розрахункові по МСЕ та експериментальні форма і розміри в міліметрах здеформованих частин: а – традиційної заготовки; б – зпрофільованої заготовки

На рис. 9 показані здеформовані заготовки в розрізі, які отримані відбортуванням традиційної та зпрофільованої заготовки. Розрахункові по МСЕ та експериментальні форми та розміри здеформованих частин заготовок приведені на рис. 10. На розрахункових даних тонкими лініями зображений деформуючий інструмент. При відбортуванні традиційної заготовки має місце потоншення торця заготовки (з 1,5 до 1 мм) здеформованої частини та викривлення на величину 0,4 мм (рис. 10, а). Наявність викривлення потребує додаткової операції калібрування шляхом подальшого потоншення. При відбортуванні отворів у попередньо зпрофільованій заготовці стінка здеформованої частини має постійну товщину 1,5 мм по всій довжині та

виключається її викривлення (рис. 10, б). Отримання вказаної товщини відкриває можливості суттєвого збільшення висоти відбортованої частини подальшим потоншенням в порівнянні з відбортуванням традиційної заготовки.

Висновки. Методом скінченних елементів проведений аналіз процесу відбортування отворів у зпрофільованій заготовці із маловуглецевої сталі в матриці з різним радіусом заокруглення. Встановлені залежності зусилля відбортування від переміщення пуансону та форма і розміри здеформованих заготовок. Зі збільшенням радіусу заокруглення матриці зусилля відбортування зменшується та знижується потоншення стінки на радіусі заокруглення. Радіуси заокруглення матриці впливає на висоту відбортованої частини заготовки. Чим більший радіус, тим більша висота. Для конкретного радіусу заокруглення матриці проведений чисельний та натурний експеримент по відбортуванню круглих отворів у зпрофільованій заготовці з алюмінію. Розрахункові дані показали добру відповідність результатам експерименту, що дозволяє використовувати результати розрахунків для проектування технології відбортування.

Список літератури: 1. *Романовский В. П.* Справочник по холодной штамповке. 6–е изд., перераб. и доп. / *В. П. Романовский* . – Ленингр. отд–ние: Машиностроение. 1979. – 520 с. **2.** *Аверкиев Ю. А.* Холодная штамповка / *Ю. А. Аверкиев*. Издательство Ростовского университета , 1984. – 288 с. **3.** *Аверкиев Ю. А.* Технология холодной штамповки / *Ю. А. Аверкиев., А. Ю. Аверкиев*. – М: Машиностроение, 1989. – 304 с. **4.** Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Под ред.. А.Д. Матвеева; Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985–1987. – 544 с. **5.** *Калюжний О.В*. Спосіб відбортування отворів // О.В. Калюжний, С.А. Пахолко, І.П. Куліков. Патент України на корисну модель №69344 МПК 21D 26/02, заявка u201112215 від 18.10.2011, опубл.25.04.2012, бюл. №8/2012. **6.** *Калюжний В.Л.* Виключення потонщення стінки і викривлення торця при відбортуванні отворів / В.Л. Калюжний, С.А. Пахолко, І.П. Куліков// Вісник НТУ «ХПІ», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – 2011. – № 46. – С. 41–48. **7.** *Калюжний В.Л.* Вплив геометричної форми пуансону на відбортування круглих отворів у зпрофільованій заготовці / В.Л. Калюжний, І.П. Куліков// Вісник НТУ «ХПІ», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – 2012. – № 46. – С. 50–56.

Bibliography (transliterated): 1. Romanovskiy V. P. Spravochnik po holodnoy shtampovke. 6–e izd., pererab. i dop. / V. P. Romanovskiy . – Leningr. otd–nie: Mashinostroenie. 1979. – 520 P. **2.** Averkiev Yu. A. Holodnaya shtampovka / Yu. A. Averkiev. Izdatelstvo Rostovskogo universiteta, 1984. – 288 P. **3.** Averkiev Yu. A. Tehnologiya holodnoy shtampovki / Yu. A. Averkiev., A. Yu. Averkiev. – Moscow: Mashinostroenie, 1989. – 304 P. **4.** Kovka i shtampovka: Spravochnik: V 4 t. T. 4. Listovaya shtampovka / Pod red.. A.D. Matveeva; Red. sovet: E.I. Semenov (pred.) i dr. – Moscow: Mashinostroenie, 1985–1987. – 544 P. **5.** Kalyuzhniy O.V. Sposib vidbortuvannya otvorIv // O.V. Kalyuzhniy, P.A. Paholko, I.P. Kulikov. Patent Ukrayini na korisnu model No 69344 MPK 21D 26/02, zayavka u201112215 vId 18.10.2011, opubl.25.04.2012, byul. No 8/2012. **6.** Kalyuzhniy V.L. Viklyuchennya potonschennya stInki i vikrivlennya tortsya pri vidbortuvannI otvorIv / V.L. Kalyuzhniy, P.A. Paholko, I.P. KulIkov// VIsnik NTU «HPI», SerIya «Novi rishennya v suchasnih tehnologIyah». – 2011. – No 46. – P. 41–48. **7**. Kalyuzhniy V.L. Vpliv geometrichnoyi formi puansonu na vIdbortuvannya kruglih otvoriv u zprofIlovanIy zagotovtsI / V.L. Kalyuzhniy, I.P. Kulikov// Visnik NTU «HPI», Seriya «Novi rishennya v suchasnih tehnologiyah». – 2012. – No 46. – P. 50–56.

Надійшла (received) 28.10.2014

УДК 621.73

Б. С. КАРГИН, канд. техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»;
С. Б. КАРГИН, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ШТАМПОВ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Представлены результаты комплексных исследований по повышению стойкости штампов при горячей объёмной штамповке стали. Рассмотрены основные причины выхода штампов из строя, влияние азотирования, марки стали и типа технологической смазки (ТС) на стойкость штампов. Стойкость штампов в большой мере определяется структурой и свойствами поверхностных слоёв, которые претерпевают наиболее ощутимые изменения в процессе эксплуатации. Дано описание установки для автоматизированного нанесения ТС на гравюру штампа. На основании производственных исследований установлены эффективные методы повышения стойкости штампов при горячей объёмной штамповке.

Ключевые слова: штамп, смазка, стойкость, пресс, установка, гравюра, графит.

Введение. Одной из актуальных проблем кузнечно-штамповочного производства является повышение стойкости штампов. Известно, что придание штампам повышенной стойкости и работоспособности является трудной задачей.

С этой точки зрения исследования, направленные на изучение влияния азотирования, марки штамповой стали, типа ТС и способов её подачи на стойкость штампов представляют определённый интерес.

Анализ последних исследований и публикаций. Разрушение штампов является причиной снятия их с эксплуатации. Под разрушением понимают изменение первоначальных свойств штампа, приводящее к невозможности его дальнейшей эксплуатации [1]. Выделяют следующие основные виды разрушений [2]: образование трещин, необратимая пластическая деформация и изнашивание (истирание) гравюры. В большинстве случаев работоспособность штампов (стойкость) зависит от марки стали и состояния поверхностного слоя. Разрушение поверхностного слоя определяется циклическим температурным полем, состоянием контактной поверхности и напряжениями от технологической нагрузки. При этом зона разрушения не распространяется глубже, чем на 3 мм. Как правило, разрушение начинается в поверхностном слое толщиной до 0,1 мм [3]. Механизм этого разрушения весьма сложен, сопровождается многими физическими и химическими явлениями, и так как штампы горячего деформирования работают в сложных условиях пульсирующих механических и термических воздействий [4].

Азотирование поверхностного слоя штампов, применение износостойких

© Б. С. Каргин, С. Б. Каргин, 2014

марок сталей, введение на поверхность контакта деформируемого металла с инструментом эффективной технологической смазки являются резервом для повышения стойкости штампов.

Целью работы является изучение влияния азотирования, марки стали, типа технологической смазки и способа её нанесения на поверхность штампа на их стойкость.

Изложение основного материала. Стойкость штампов в большой мере определяется структурой и свойствами поверхностных слоёв, которые претерпевают наиболее ощутимые изменения в процессе эксплуатации. Поэтому химико-термическая обработка, сообщающая поверхностным слоям ряд специфических свойств, являются одним из эффективных способов повышения срока службы штампов.

В настоящей работе представлены результаты производственных исследований, проведенных на Токмакском кузнечно-штамповочном заводе при изготовлении поковки «шестерня полуоси заднего моста» на КГШП силой 40 МН. Для анализа влияния азотирования был выбран сборный штамп и две наиболее проблемные детали штампа – прошивник II перехода и прошивник III перехода. Оба прошивника изготовлены из стали 3Х2В8Ф и подвергнуты азотированию согласно стандарту предприятия после термообработки. Азотируемые поверхности имели матово-серебристый цвет. На образцах свидетелях не было обнаружено сколов, шелушения. Глубина слоя азотирования на шлифе образца свидетеля составила 0,4÷0,6 мм.

Экспериментально установлено, что прошивники работают при температуре 550÷600 ºС и поэтому повышение термической устойчивости (от азотирования) для них весьма эффективно, так как присутствие вольфрама и хрома в α-твердом растворе способствует образованию нитридных фаз большой твёрдости и устойчивости против каогуляции, что способствует возрастанию стойкости штампов.

Анализ экспериментальных данных по стойкости азотированных и неазотированных прошивников сборных штампов при выдавливании поковок «шестерня» показал, что азотирование позволило повысить стойкость штампового инструмента в среднем на 30 %.

Производственные исследования по влиянию марки штамповой стали на стойкость штампов были проведенны в кузнечно-штамповочных цехах ТКЗ (г. Таганрог) и ТКШЗ (г. Токмак) при штамповке поковки «шатун» на КГШП силой 25 МН. Вместо ранее применяемой штамповой стали 5ХНМ были предложены стали ДИ-23 (45Х3В3МФС) и ДИ-32 (5Х2ВМФН). Эти стали поставляются Запорожским заводом «Электросталь» и Волгоградским заводом

«Баррикады». Гравюры штампов получали путём электроимпульсной обработки.

Было установлено, что применение износостойких марок сталей ДИ-23 и ДИ-32 позволяет повысить стойкость штампов в 2–2,3 раза. При этом повышаются эксплуатационные показатели, такие как: сопротивление смятию, сопротивление образованию разгарных трещин и сопротивление истиранию. Из двух испытанных марок сталей приоритет имеет сталь ДИ-23.

Эффективным средством для нейтрализации отрицательного действия деформационного трения являются технологические смазки, которые вводятся на поверхность контакта деформируемого металла с инструментом. В настоящее время установлено [4], что (ТС) выполняет не только экранирующие функции, но вступает в химико-физическое взаимодействие с окалиной деформируемого металла. В результате этого взаимодействия образуется поверхностный пластифицированный слой, обладающий пониженной механической прочностью и способствующий протеканию деформации при меньших нагрузках. Осуществление деформации в условиях низких значений сил внешнего трения позволяет интенсифицировать процесс горячей штамповки, а применение эффективной смазки позволяет снизить износ и увеличить стойкость инструмента.

Кафедра кузнечно-штамповочного производства занимается вопросом разработки и внедрения технологических смазок с 1970 года. В частности, совместно с ПО «Маркограф» были разработаны эффективные водно-графитовые технологические смазки типа ОГВ-75, ГФП, ГФПО, ГФПД, В-1. Производственные исследования были проведены в кузнечно-штамповочных цехах ЗИЛа (г. Москва), ГАЗа (г. Н.-Новгород), ТКЗ (г. Таганрог), ТКШЗ (г. Токмак), ХТЗ (г. Харьков) и показали, что стойкость штампов при этом повышается на 20-25 %. На ТКЗ смазка В-1 успешно заменила масло-графитовую смазку «Сумидера ТР199» (Германия) при штамповке поковки «ось колеса» массой 40 кг на автоматической линии «Хозенклевер» (пресс силой 63 МН). При использовании ТС «Сумидера» образуется пламя, дым и неблагоприятные санитарно-гигиенические условия, что было неоднократно отмечено актами. При этом водно-графитовая смазка В-1 в 5 раз дешевле, чем «Сумидера».

На уменьшение износа штампов КГШП влияет не только состав смазки, но и периодичность её нанесения. Обзор конструкторских разработок показал, что в основном применяют инжекторные установки. Однако они имеют ряд недостатков:

1. Данные установки сложны в изготовлении. Практически все они имеют ёмкость высокого давления воздуха со смазкой.

2. Сложные выходные форсунки.

3. В процессе эксплуатации практически отсутствует возможность осуществлять продувку устройств.

4. При применении различных ТС требуется их постоянное перемешивание, т.к. твёрдые частицы графита, находясь в наполнителе (воде) оседают на дно ёмкости. Для инжекторных систем в таком случае требуются механические установки для перемешивания смазки, что вызывает определённые трудности с конструкторской точки.

Для автоматической подачи смазки распылением на кривошипном прессе силой 25 МН при штамповке поковки «шатун» была предложена эжекторная установка. Установка состоит из двухрежимной головки, автоматического реле времени, электромагнита и бесконтактного выключателя и работает следующим образом. При ходе ползуна пресса срабатывает бесконтактный выключатель и подаёт сигнал через реле времени на электромагнит, который через тяги действует на рычаг и проворачивает гильзу в корпусе головки. Через штуцер подвода воздуха поступает воздушная струя формируемая соплом, т.к. во время включения направление сопла совпадает с направлением камеры перемешивания выполненной в корпусе головки. Штуцер всоса соединён посредством резинового шланга с открытой ёмкостью, в которой находится смазка. В результате движения воздуха между лицевым торцом гильзы и днищем корпуса образуется зона низкого давления (по проведенным экспериментам давление падало до 315 мм водного столба). В результате чего, смазка под действием атмосферного давления устремляется в камеру перемешивания и через направляющую головку наносится на гравюру штампа. В направляющей головке выполнено два отверстия для нанесения ТС на верхнюю и нижнюю вставки штампа. Направление выходных отверстий направляющей головки подбиралось с учётом места расположения устройства и расстояния до вставок. По сигналу реле времени электромагнит может выдерживать заданную длительность цикла подачи ТС от 1 до 10 с. Ёмкость под смазку выполняли из условия, что расход смазки составляет 10÷граммов на поковку. Данное устройство было изготовлено на кафедре КШП, установлено и внедрено.

Стойкость кузнечных штампов определяет стоимость поковок. По данным указанных заводов стоимость штамповой оснастки составляет до 30 % от себестоимости поковок, что делает проблему повышения стойкости штампов весьма актуальной.

Выводы. На основании производственных исследований установлены эффективные методы повышения стойкости штампов при горячей объёмной

штамповке. Показано, что за счёт азотирования, замены штамповой стали 5ХНМ на сталь ДИ-23, применения водно-графитовых смазок ОГВ-75, В-1, ГФП и внедрения установки для автоматизирпованного нанесения ТС на гравюру штампа распылением, можно добиться снижения себестоимости поковок.

Список литературы: 1. *Аксёнов Л.Б.* Системное проектирование процессов штамповки. / *Л.Б. Аксёнов*. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1990. – 240 с. **2**. Штампы для горячего деформирования металлов / Под ред. *М.А. Тылкина*. – М.: Высшая школа, 1977. – 496 с. **3.** *Макушок Е.М.* Массоперенос в процессах трения./ *Е.М. Макушок*. – Минск: Наука и техника, 1978. – 272 с. **4.** *Довнар С.А.* Термомеханика упрочнения и разрушения штампов объёмной штамповки / *С.А. Довнар.* – М.: Машиностроение, 1975. – 254 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Aksjonov L.B.* Sistemnoe proektirovanie processov shtampovki L.B. Aksjonov. – Leningrad.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1990. – 240 P. **2.** Shtampy dlja gorjachego deformirovanija metallov Pod red. MOSCOWA. Tylkina. – Moscow: Vysshaja shkola, 1977. – 496 P. **3.** *Makushok E.M.* Massoperenos v processah trenija. E.M. Makushok. – Minsk: Nauka i tehnika, 1978. – 272 P. **4.** *Dovnar P.A.* Termomehanika uprochnenija i razrushenija shtampov objomnoj shtampovki P.A. Dovnar. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 254 P.

Поступила (received) 28.10.2014

УДК 621.923

О. С. КЛЕНОВ, канд. техн. наук, Фирма “ДиМерус Инженеринг”, Харьков;
Ф.В. НОВИКОВ, докт. техн. наук, ХНЭУ;
А.Г. КРЮК, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ РЕЗАНИЯ И УСЛОВИЙ ЕЕ УМЕНЬШЕНИЯ

В работе рассмотрены различные теоретические подходы к определению силы резания лезвийным инструментом. Показано, что в конечном итоге они сводятся к единому решению, из которого определены основные условия уменьшения силы резания, состоящие в уменьшении разности условного угла трения на передней поверхности инструмента и переднего угла инструмента. Показано, что в случае увеличения разности этих углов до 90^0, сила резания неограниченно увеличивается. Установлено, что тангенциальная составляющая силы резания больше радиальной составляющей силы резания, а при шлифовании, наоборот, меньше.

Ключевые слова: процесс резания, лезвийный инструмент, резец, обрабатываемый материал, стружка, сила резания, касательное напряжение.

Введение. В настоящее время на финишных операциях обработки деталей машин все шире используются методы резания лезвийными инструментами, обеспечивающими высококачественную обработку за счет снижения силовой напряженности процесса резания. На ряде операций они успешно конкурируют с методами шлифования, которые в силу наличия трения связки круга с обрабатываемым материалом приводят к высокой тепловой напряженности процесса резания и появлению на обрабатываемых

© О. С. Кленов, Ф. В. Новиков, А. Г. Крюк, 2014

поверхностях деталей прижогов, микротрещин и других дефектов. Чтобы эффективно управлять процессом резания лезвийным инструментом, необходимо располагать теоретическими решениями о силовой напряженности процесса резания, т.е. знать характер изменения силы резания и условия ее уменьшения.

Анализ последних достижений и литературы. Определению силы резания посвящены многочисленные теоретические исследования [1–3], выполненные на основе как упрощенных подходов сопротивления материалов, так и уточненных подходов теории упругости. Однако в полной мере данная задача не решена из-за ее сложности. Имеются лишь частные решения, справедливые для отдельных условий обработки. Вместе с тем, все возрастающие требования к повышению эффективности процессов резания лезвийными инструментами труднообрабатываемых материалов предопределяет необходимость знания закономерностей уменьшения силовой напряженности процесса резания с целью повышения качества и производительности обработки, стойкости инструмента. В связи с этим важно провести теоретический анализ силы резания и условий ее уменьшения.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является обоснование условий уменьшения силовой напряженности процесса резания на основе аналитического определения силы резания лезвийным инструментом.

Материалы исследований. Для решения поставленной задачи рассмотрим основные подходы к определению силы резания лезвийным инструментом.

1. Классическое решение об условии разрушения прямолинейного бруса (пластины) от действия двух сжимающих сил *P* (рис. 1).

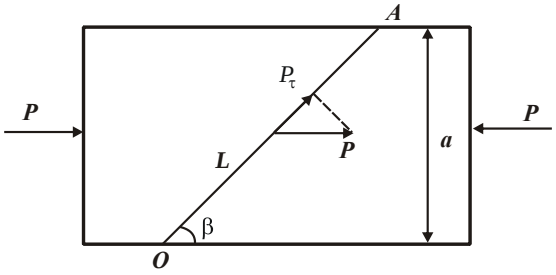


Рис. 1 – Расчетная схема

Касательное напряжение τ, возникающее в плоскости ОА длиной $L = a/\sin\beta$, расположенной под углом β, от силы $P_\tau = P \cdot \cos\beta$, равно

$$\tau = \frac{P_\tau}{в \cdot L} = \frac{2P \cdot sin2\beta}{a \cdot в}, \qquad (1)$$

где a, $в$ – толщина и ширина пластины, м.

Наибольшее значение τ достигается при условии $\sin 2\beta = 1$, т.е. при $\beta = 45^{\circ}$.

Определим силу P, при которой происходит разрушение пластины (достижение в плоскости ОА предела прочности материала на сдвиг $\tau_{сдв}$, т.е. $\tau = \tau_{сдв}$). Подставляя в (1) значение $\beta = 45^{0}$ и $\tau = \tau_{сдв}$ с учетом $\sigma_{сж} \approx 2\tau_{сдв}$, получено:

$$P = 2 \cdot a \cdot в \cdot \tau_{сдв} \approx a \cdot в \cdot \sigma_{сж}, \qquad (2)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности материала на сжатие, Н/м^2.

2. Решение об условии разрушения пластины от действия двух сил P_z и P_y (определяющих составляющие силы резания, например при точении, рис. 2).

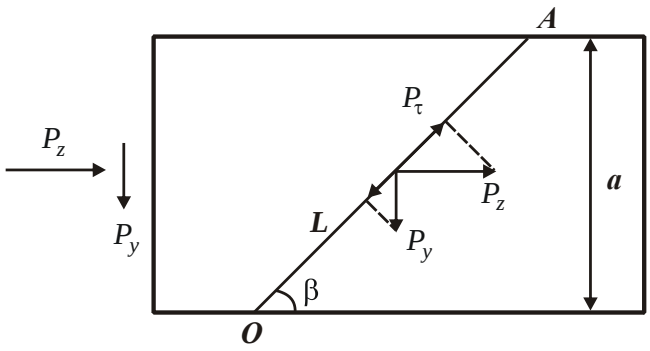


Рис. 2 – Расчетная схема

По аналогии с предыдущим решением, касательное напряжение τ, возникающее в плоскости ОА, расположенной под углом β, определится:

$$\tau = \frac{\sin\beta}{a \cdot в}\left(P_z \cdot \cos\beta - P_y \cdot \sin\beta\right) = \frac{P_y \cdot \sin\beta}{a \cdot в}\left(K_{рез} \cdot \cos\beta - \sin\beta\right). \qquad (3)$$

При точении $K_{рез} = P_z / P_y = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma)$, где ψ – условный угол трения на передней поверхности инструмента; γ – передний угол инструмента (резца) [4]. Тогда

$$\tau = \frac{P_y}{a \cdot в}\left(\frac{0{,}5\sin 2\beta}{\operatorname{tg}(\psi - \gamma)} - \sin^2\beta\right). \qquad (4)$$

Исходя из зависимости (4), имеет место экстремум (максимум) касательного напряжения τ от угла β (рис. 4). Для его определения подчиним зависимость (4) необходимому условию экстремума: $\tau'_{\beta} = 0$. Откуда, после преобразований получено $\cos(\psi - \gamma + 2\beta) = 0$ или $\beta = 45^{\circ} + \frac{(\gamma - \psi)}{2}$. В итоге пришли

к известной зависимости Зворыкина К.А. для определения угла сдвига материала при резании.

Результаты исследований. Для определения тангенциальной составляющей силы резания $P_z = \dfrac{P_y}{\mathrm{tg}(\psi - \gamma)}$ подставим в (4) выражение $\beta = 45^\circ + \dfrac{(\gamma - \psi)}{2}$ при $\tau = \tau_{сдв}$:

$$P_z = 2 \cdot a \cdot в \cdot \tau_{сдв} \cdot \frac{1}{\mathrm{tg}\left[45^\circ - \dfrac{(\psi - \gamma)}{2}\right]}. \qquad (5)$$

Очевидно, сила P_z, определяемая зависимостью (5), будет больше силы P, определяемой зависимостью (2), т.к. $\psi > \gamma$ и $\mathrm{tg}\left[45^\circ - \dfrac{(\psi - \gamma)}{2}\right] < \mathrm{tg}45^\circ$. Следовательно, наличие силы P_y приводит к увеличению силы P_z по сравнению со случаем разрушения прямолинейного бруса (пластины) при условии P_y=0. Исходя из зависимости (5), уменьшить тангенциальную составляющую силы резания P_z можно уменьшением угла $\psi - \gamma$ за счет уменьшения угла ψ и увеличения угла γ.

3. При взаимодействии резца с обрабатываемым материалом на передней поверхности резца действуют: нормальная сила N и сила трения F, образующаяся в результате трения сходящей стружки с передней поверхностью резца (рис. 3).

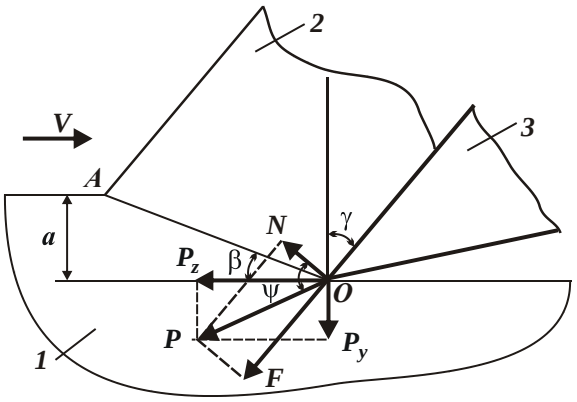


Рис. 3 – Расчетная схема составляющих силы резания: 1– обрабатываемый материал; 2 – стружка; 3 – резец

Суммарная сила резания равна: $P = \sqrt{N^2 + F^2}$. С учетом $\frac{F}{N} = \mathrm{tg}\psi = f$ имеем $P = N \cdot \sqrt{1 + f^2}$, где f – коэффициент трения на передней поверхности инструмента.

Образование стружки происходит вследствие периодических сдвигов элементарных объемов обрабатываемого материала вдоль условной плоскости сдвига ОА [5]. Для определения ее положения необходимо установить угол β из условия достижения наибольшего касательного напряжения: $\tau = \frac{P_\tau}{в \cdot L}$, где $P_\tau = P \cdot \cos(z + \beta)$ – проекция силы резания P на условную плоскость сдвига материала ОА, Н; $L = a / sin\beta$ – длина условной плоскости сдвига материала ОА, м; $z = \psi - \gamma$. Тогда

$$\tau = \frac{N \cdot \sqrt{1 + f^2} \cdot \cos(z + \beta) \cdot \sin\beta}{a \cdot в} = \frac{N \cdot \sqrt{1 + f^2} \cdot [\sin(z + 2\beta) - \sin z]}{2 \cdot a \cdot в}. \quad (6)$$

Как следует из зависимости (6), касательное напряжение τ принимает наибольшее значение при условии $\sin(z + 2\beta) = 1$ или $z + 2\beta = 90^\circ$. Откуда

$$\beta = 45^\circ - \frac{z}{2} = 45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2}. \quad (7)$$

Принимая $\tau = \tau_{max} = \tau_{сдв}$, из зависимости (6) можно определить силы N и P:

$$N = \frac{2 \cdot a \cdot в \cdot \tau_{сдв}}{\sqrt{1 + f^2}} \cdot \frac{1}{[\sin(z + 2\beta) - \sin z]} = \frac{2 \cdot a \cdot в \cdot \tau_{сдв}}{\sqrt{1 + f^2}} \cdot \frac{1}{[1 - \sin(\psi - \gamma)]}; \quad (8)$$

$$P = \frac{2 \cdot a \cdot в \cdot \tau_{сдв}}{[1 - \sin(\psi - \gamma)]}. \quad (9)$$

Как следует из зависимости (9), сила резания P тем меньше, чем меньше толщина среза a и угол $z = \psi - \gamma$, т.е. чем меньше угол ψ и больше γ. Тангенциальная P_z и радиальная P_y составляющие силы резания определятся (рис. 3):

$$P_z = P \cdot \cos z = \frac{2 \cdot a \cdot в \cdot \tau_{сдв} \cdot \cos(\psi - \gamma)}{[1 - \sin(\psi - \gamma)]}; \quad (10)$$

$$P_y = P \cdot \sin z = \frac{2 \cdot a \cdot в \cdot \tau_{сдв} \text{Ч} \sin(\psi - \gamma)}{[1 - \sin(\psi - \gamma)]}. \quad (11)$$

При шлифовании следует рассматривать угол $\psi + \gamma$, тогда

$$P_z = P \cdot \cos z = \frac{2 \cdot a \cdot в \cdot \tau_{сдв} Ч \cos(\psi + \gamma)}{\left[1 - \sin(\psi + \gamma)\right]}; \quad (12)$$

$$P_y = P \cdot \sin z = \frac{2 \cdot a \cdot в \cdot \tau_{сдв} Ч \sin(\psi + \gamma)}{\left[1 - \sin(\psi + \gamma)\right]}. \quad (13)$$

Отношение $P_z / P_y = \operatorname{ctg}(\psi + \gamma) \to 0$. Следовательно, при шлифовании, в отличии от лезвийной обработки, тангенциальная составляющая силы резания меньше радиальной составляющей силы резания.

Выводы. В работе рассмотрены различные теоретические подходы к определению силы резания лезвийным инструментом. Исходя из условия максимума касательного напряжения, возникающего в условной плоскости сдвига обрабатываемого материала, определены тангенциальная и радиальная составляющие силы резания. Показано, что в конечном итоге они сводятся к единому решению, из которого вытекают основные условия уменьшения силы резания, состоящие в уменьшении разности условного угла трения на передней поверхности инструмента и переднего угла инструмента. Показано также, что в случае увеличения разности этих углов до значения, равного 90^0, сила резания неограниченно увеличивается. Это свидетельствует о высокой силовой напряженности процесса шлифования, характеризующегося значительными отрицательными передними углами режущих зерен. Установлено, что при резании лезвийными инструментами тангенциальная составляющая силы резания больше радиальной составляющей силы резания, а при шлифовании, наоборот, меньше.

Список литературы: 1. *Бобров В.Ф.* Основы теории резания металлов / *В.Ф. Бобров*. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с. **2.** *Грановский Г.И*. Резание металлов: учебник / *Г.И. Грановский, В.Г. Грановский*. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с. **3**. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с. **4.** *Новіков Ф.В*. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / *Ф.В. Новіков, І.О. Рябенков*. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с. **5.** Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. *Ф.В. Новикова и А.В. Якимова*. В десяти томах. – Т. 10. ”Концепции развития технологии машиностроения” – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Bobrov V.F.* Osnovy teorii rezaniya metallov *V.F. Bobrov*. –Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 343 p. **2.** *Granovskiy G.I.* Rezanie metalov: uchebnik *G.I. Granovskiy, B.G. Granovskiy*. – Moscow: Vysshaya shkola, 1985. – 304 p. **3**. Loladze T.N. Prochnost i iznosostoykost rezhushego instrumenta T.N. Loladze. – Moscow: Mashinostroenie, 1982. – 320 p. **4.** *Novikov F.V.* Teoretychni osnovy mekhanichnoi obrobky vysokotochnykh detaley: monografiya *F.V. Novikov, I.O. Ryabenkov*. – Kharkiv: Vyd. KhNEU, 2013. – 352 p. **5**. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya Pod obsh. red. *F.V. Novikova i A.V. Yakimova*. V 10 tomakh. – T. 10. ”Kontseptsii razvitiya tekhnologii mashinostroeniya” – Odessa: ONPU, 2005. – 565 p.

Поступила (received) 29.10.2014

УДК 621.77.014

Т. Б. КОРОБКО, канд. техн. наук, доц., ДонДТУ, Алчевськ;
А. Г. ПРИСЯЖНИЙ, ст. викл., ДВНЗ «ПДТУ», Маріуполь;
М. О. СВЯТОЙ, ПАТ «ММК ім. Ілліча», Маріуполь;
М .Г. КОРЕНКО, канд. техн. наук, КМІ ДВНЗ «КНУ», Кривий Ріг

УТОЧНЕНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПОДВОЄНОГО ОПОРУ МЕТАЛУ ЗРУШЕННЮ ПРИ ХОЛОДНІЙ ТОНКОЛИСТОВІЙ ПРОКАТЦІ

У статті проаналізовані математичні моделі напруження плинності і подвоєного опору металу зрушенню при холодному тонколистовому прокатуванні. На основі виконаного аналізу показана доцільність урахування у вказаних моделях впливу температурно-швидкісних умов процесу деформації. Вдосконалена авторами статті числова математична модель дозволила уточнити розрахунок подвоєного опору металу зрушенню із врахуванням температури і швидкості холодної тонколистової прокатки, а також реального характеру розподілу по довжині осередку деформації геометричних параметрів і показників зовнішнього контактного тертя.

Ключові слова: холодна прокатка, напруження плинності, подвоєний опір зрушенню, температурно-швидкісні умови, осередок деформації, математичне моделювання.

Вступ. Розвиток технології виробництва холоднокатаних штаб обумовлює необхідність підвищення точності математичних моделей, що забезпечують роботу систем автоматизованого управління технологічним процесом. Зокрема, достовірність визначення розрахункових значень подвоєного опору зрушенню деформованого металу істотно впливає на точність прогнозування енергосилових параметрів прокатки [1].

Аналіз останніх публікацій і постановка проблеми. Автор роботи [2] вважає, що розрахункове визначення значень напруження плинності і, отже, подвоєного опору зрушенню металу потрібно здійснювати тільки в залежності від показника ступеня обтиснення смуг, які прокатують. В роботах [3, 4] показано, що нехтування впливом температурно-швидкісних умов деформації призводить до істотних похибок розрахунку значень величин $\sigma_т$ і $2K$. Для визначення напруження плинності і подвоєного опору зрушенню смуг залежно від швидкості холодної прокатки В. Робертсом [5] розроблено математичну модель, яка не враховує вплив температури деформації. Більш працездатний метод розрахунку запропоновано в роботі [6]. Проте в даному методі не враховано вплив ступеня попереднього обтиску металу. Відзначених недоліків позбавлена математична модель авторів роботи [4]. Використовуваний при цьому числовий підхід до розрахунку нормальних контактних напружень, що визначають температуру смуги, характеризується низкою припущень, основними з яких є сталість коефіцієнта тертя по довжині осередку деформації, застосування закону тертя Амонтона-Кулона, а також ідеалізація реальної

© Т. Б. Коробко, А. Г. Присяжний, М. О. Святой, М .Г. Коренко, 2014

форми контактної поверхні робочих валків. Математична модель [7] виключає прийняття зазначених припущень, тому представляє інтерес уточнення на її основі методу [4] кількісної оцінки локальних і інтегральних значень величин $\sigma_{\text{т}}$ і $2K$.

Мета. Метою статті є вдосконалення математичної моделі для розрахунку подвоєного опору металу зрушенню з урахуванням впливу температурно-швидкісних умов холодної тонколистової прокатки.

Математична модель. Для визначення контактних напружень використовували математичну модель [7]. Осередок деформації (рис. 1, а), що складається із зон пластичної формозміни завдовжки $L_{\text{пл}}$ і пружного відновлення довжиною $L_{\text{пр}}$, розбивали з кроком Δx на кінцеву безліч n i-их елементарних об'ємів (рис. 1, б), положення граничних перетинів (перетин ae і cd на рис. 1, б) яких визначали координатами x_{i1} і x_{i2}. Висоти h_{xi1} і h_{xi2} даних перетинів розраховували на основі підходу І.Я. Штаєрмана [8], а швидкості V_{xi1} і V_{xi2} (рис. 1, б) переміщення частинок металу – на основі гіпотези ковзання [1]. При цьому, зону пластичної формозміни (рис. 1, а) розділили на зону відставання завдовжки $L_{\text{від}}$ і зону випередження, довжину $L_{\text{вип}}$ якої і товщину $h_{\text{н}}$ смуги в нейтральному перетині визначали з урахуванням напружень заднього σ_0 і переднього σ_1 натягнення, окружної швидкості валків $V_{\text{в}}$, а також товщини розкату до h_0 і h_1 після пропуску. Для розрахунку дотичних контактних напружень τ_{xi1} і τ_{xi2} (рис. 1, б) використовували закон О.М. Леванова, а для розрахунку нормальних контактних (p_{xi1} і p_{xi2}) і нормальних осьових (σ_{xi1} і σ_{xi2}) напружень – умови статико-динамічної рівноваги та пластичності.

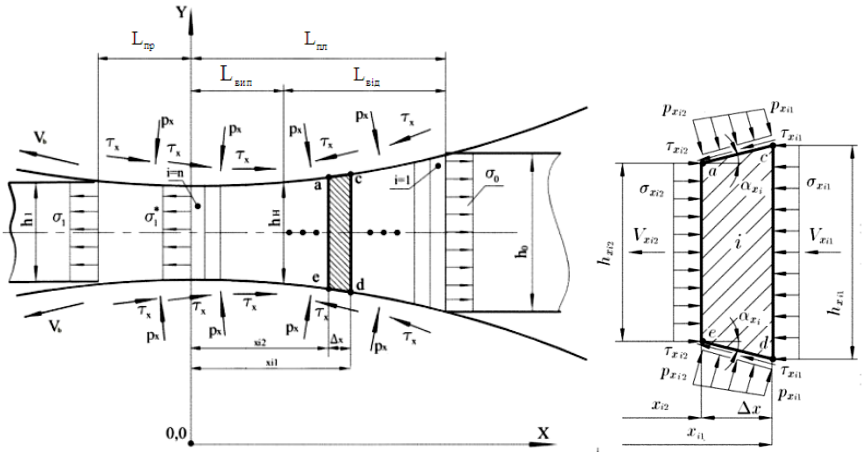


Рис. 1 – Розрахункові схеми: а – осередку деформації та б – i-го елементарного об'єму: σ_1^* – нормальне осьове напруження, що діє на границі зони пластичної формозміни і пружного відновлення; α_{xi} – кут контакту i-го елементарного об'єму з валками

Подвоєний опір металу зрушенню з урахуванням впливу температурно-швидкісних умов холодної тонколистовий прокатки визначали як [3, 4]:

$$2K_{tuxi2} = 2K_{\varepsilon xi2} \cdot k_{txi2} \cdot k_{uxi2}, \quad (1)$$

де $2K_{\varepsilon xi2}$ – поточне значення показника подвоєного опору зрушенню металу, яке визначається з урахуванням впливу зміцнення;

k_{txi2}, k_{uxi2} – поточні значення коефіцієнтів, які враховують вплив температури і швидкості деформації відповідно;

цифра 2 в індексі змінних позначає кінцевий граничний перетин (перетин ае на рис. 1, б) виділеного i -го елементарного об'єму.

Для аналітичного опису зміни значень показника $2K_{\varepsilon xi2}$ використані поліноми 3-го ступеня [7, 8]:

$$2K_{\varepsilon xi2} = 1{,}155\left(\sigma_{To} + a_1^* \varepsilon_{xi2} + a_2^* \varepsilon_{xi2}^2 + a_3^* \varepsilon_{xi2}^3\right), \quad (2)$$

де σ_{To} – значення напруження плинності металу у вихідному (відпаленому) стані;

$\varepsilon_{xi2} = \left(H_0 - h_{xi2}\right)/H_0$ – поточні значення показника сумарного ступеня обтиску металу (H_0 – товщина гарячекатаного підкату);

h_{xi2} – поточне значення товщини смуги в осередку деформації;

a_1^*, a_2^*, a_3^* – коефіцієнти, які залежать від хімічного складу металу [8].

Значення коефіцієнтів k_{txi2} і k_{uxi2} розраховували за аналогією з авторами робіт [3, 4]:

$$k_{txi2} = a_0 + a_1\left(\frac{t_{xi2} - t_{\text{ст}}}{t_{\text{пл}}}\right) + a_2\left(\frac{t_{xi2} - t_{\text{ст}}}{t_{пл}}\right)^2 + a_3\left(\frac{t_{xi2} - t_{\text{ст}}}{t_{\text{пл}}}\right)^3; \quad (3)$$

$$k_{uxi2} = 1 + \frac{7682{,}4}{2K_{\varepsilon xi2} \cdot k_{txi2}}\left(\frac{u_{xi2}}{5 \cdot 10^{11} \cdot 60{,}842^{\ln\left(h_0/h_{xi2}\right)}}\right)^{\frac{\chi\left(t_{xi2}+273\right)}{0{,}14}}, \quad (4)$$

де a_0, a_1, a_2, a_3 – коефіцієнти, які залежать від хімічного складу металу [3];

t_{xi2} – поточне значення температури смуги в осередку деформації;

$t_{cT} = 20^{\circ}\text{C}$ – температура металу при статичних випробуваннях;

$t_{\text{пл}}$ – температура плавлення металу;

$u_{xi2} = 2\Delta h V_1 h_1\left(x_{i2}/L_{пл}\right)/h_{xi2}^2 L_{пл}$ – поточне значення швидкості деформації (V_1 – швидкість прокатки; $\Delta h = h_0 - h_1$ – абсолютне обтиснення за пропуск);

χ – постійна Больцмана ($0{,}862 \cdot 10^{-4}$, еВ / К).

З урахуванням рекомендацій автора [3] для визначення значень величини t_{xi2} використана алгоритмічна послідовність виду:

$$\Delta x_{xi2} = \frac{\eta_{вых} p_{пл\lambda_{xi2}}}{\gamma_м c_м}; \tag{5}$$

$$t^*_{xi2} = \frac{2\lambda h_{xi2} L_{пл}\left[1-\left(x_{i2}/L_{пл}\right)\right]}{V_1\left(h_0 + h_{xi2}\right)}; \tag{6}$$

$$t_{xi2} = \left(t_0 + \Delta t_{xi2} - t_в\right) exp\left(-\frac{4}{\gamma_м c_м \left(h_0 + h_{xi2}\right)}\sqrt{\frac{\gamma_в c_в \lambda_в t^*_{xi2}}{\pi}}\right) + t_в, \tag{7}$$

де t_{xi2}– поточне по довжині $L_{пл}$ (рис. 1, а) приростання температури смуги за рахунок тепла, що виділяється при деформації;

$p_{пл}$ – середнє на ділянці пластичної формозміни значення тиску металу на валки, яке визначається з урахуванням результатів розрахунку нормальних контактних напружень p_{xi1} і p_{xi2};

$\eta_{вих}$ – коефіцієнт виходу тепла при деформації, рівний 0,84 – 0,94 [3];

$\lambda_{xi2} = h_0 / h_{xi2}$ – поточні значення коефіцієнта обтиску;

$\gamma_м, c_м$ – відповідно питома вага і теплоємність металу;

t^*_{xi2} – поточне по довжині зони формозміни значення тривалості контакту частинок металу із валками;

$\lambda = h_0 / h_1$ – коефіцієнт обтиску смуги за пропуск;

t_0 – температура смуги на вході в осередок деформації;

$t_в$ – середньомасова температура робочих валків;

$\gamma_в, c_в, \lambda_в$ – відповідно питома вага, теплоємність і коефіцієнт теплопровідності матеріалу робочих валків.

Результати досліджень. В результаті числової реалізації уточненої математичної моделі (формули (1–7) отримали розрахунковий розподіл по довжині $L_{пл}$ значень ступеня обтиснення ε_{xi2}, температури t_{xi2} і швидкості u_{xi2} деформації (рис. 2), а також значень подвоєного опору металу зрушенню $2K_{\varepsilon xi2}$ і $2K_{tuxi2}$ (рис. 3). Математичне моделювання виконали стосовно до першої кліті стану холодної тонколистової прокатки ПАТ «ММК ім. Ілліча». При цьому, в якості вихідних даних використовували: матеріал смуги – сталь 08кп; товщина смуги до пропуску h_0 = 2 мм; ширина смуги = 1260 мм; показник ступеня обтиснення за пропуск ε = 0,3; напруження заднього натягнення σ_0 = 0 МПа;

напруження переднього натягнення σ_1= 100 МПа; швидкість виходу смуги із осередку деформації V_1= 5 м / с; коефіцієнт тертя f = 0,12.

Аналіз отриманих в ході математичного моделювання результатів показав, що зміна температури і швидкості деформації по довжині зони пластичної формозміни має складний характер (рис. 2). При цьому, врахування впливу температурно-швидкісних умов холодної тонколистової прокатки призводить до перерозподілу значень подвоєного опору металу зрушенню (рис. 3).

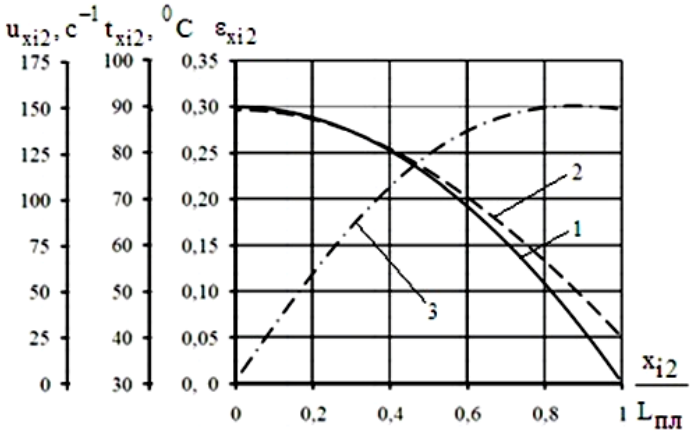


Рис. 2 –Розрахунковий розподіл значень: 1 – ступеня обтиснення ε_{xi2}, 2 – температури t_{xi2} і 3 – швидкості u_{xi2} деформації по довжині зони пластичної формозміни осередку деформації

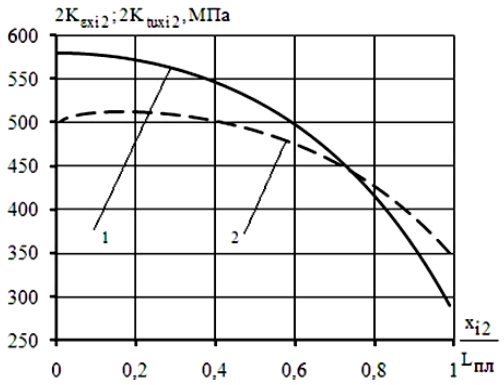


Рис. 3 – Розрахунковий розподіл по довжині зони пластичної формозміни значень подвоєного опору металу зрушенню при холодній тонколистової прокатці, який визначено з урахуванням: 1 – впливу тільки зміцнення $2K_{\varepsilon xi2}$ та 2 – з урахуванням температурно-швидкісних умов деформації $2K_{tuxi2}$

В окремих випадках відмінність у значеннях величин $2K_{\varepsilon xi2}$ і $2K_{tuxi2}$ може досягати 20% та вище, що істотно, і це повинно бути враховано при прогнозуванні тиску металу на валки, а також сили і потужності холодної прокатки тонких смуг.

Висновки. Запропонована математична модель для розрахунку подвоєного опору металу зрушенню з урахуванням впливу температурно-швидкісних умов деформування, більшою мірою відповідна реальним умовам отримання холоднокатаних смуг на промислових станах. За результатами числової реалізації розробленої математичної моделі було встановлено, що якщо виключити вплив на значення величин σ_T і $2K$ температури і швидкості холодної тонколистової прокатки, то помилка, що допускається при цьому розрахунку, досягає 20% і більше, а це підтверджує доцільність рішення поставленого в статті завдання.

Список літератури: 1. Грудев А.П. Теория прокатки. Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с. **2.** Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки. (Теория, оборудование, технология) / Э.А. Гарбер. – М.: ОАО «Черметинформация»; Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2004. – 416 с. **3.** Василев Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки / Я.Д. Василев. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с. **4.** Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические приложения). – Днепропетровск: РВА «Дніпро-VAL», 2010. – 500 с. **5.** Робертс В. Холодная прокатка стали / Cold rolling of steel: пер. с англ. / В. Робертс; под. ред. П.И. Полухина, В.П. Полухина. – М.: Металлургия, 1982. – 544 с. **6.** Капланов В.И. Динамика и трибоника высокоскоростной тонколистовой прокатки. Мировая тенденция и перспектива : монография / В.И. Капланов. – Мариуполь : Рената, 2008. – 456 с. **7.** Сатонин А.В. Развитие численных одномерных математических моделей напряженно-деформированного состояния металла при холодной прокатке относительно тонких полос / А.В. Сатонин, А.Г. Присяжный, А.М. Спаская, А.С. Чурунаков // Обработка металлов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 2(31). – С. 62–68. **8.** Федоринов В.А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос: монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков; Донбас. гос. машиностроит. акад. – Краматорск, 2010. – 243 с.

Bibliography (transliterated): 1. Grudev A.P. Teorija prokatki. Uchebnik dlja vuzov. – Moscow: Metallurgija, 1988. – 240 P. **2.** Garber Je.A. Stany holodnoj prokatki. (Teorija, oborudovanie, tehnologija) Je.A. Garber. – Moscow: OAO «Chermetinformacija»; Cherepovec: GOU VPO ChGU, 2004. – 416 P. **3.** Vasilev Ja.D. Inzhenernye modeli i algoritmy rascheta parametrov holodnoj prokatki Ja.D. Vasilev. – Moscow: Metallurgija, 1995. – 368 P. **4.** Mazur V.L., Nogovicyn A.V. Teorija i tehnologija tonkolistovoj prokatki (chislennyj analiz i tehnicheskie prilozhenija). – Dnepropetrovsk: RVA «Dnipro-VAL», 2010. – 500 P. **5**. Roberts V. Holodnaja prokatka stali Cold rolling of steel: per. s angl. V. Roberts; pod. red. P.I. Poluhina, V.P. Poluhina. – Moscow: Metallurgija, 1982. – 544 P. **6.** Kaplanov V.I. Dinamika i tribonika vysokoskorostnoj tonkolistovoj prokatki. Mirovaja tendencija i perspektiva: monografija V.I. Kaplanov. – Mariupol': Renata, 2008. – 456 P. **7.** Satonin A.V. Razvitie chislennyh odnomernyh matematicheskih modelej naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija metalla pri holodnoj prokatke otnositel'no tonkih polos A.V. Satonin, A.G. Prisjazhnyj, A.M. Spaskaja, A. P. Churunakov Obrabotka metallov davleniem: sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2012. – No 2(31). – P. 62–68. **8**. Fedorinov V.A. Matematicheskoe modelirovanie naprjazhenij, deformacij i osnovnyh pokazatelej kachestva pri prokatke otnositel'no shirokih listov i polos : monografija V. A. Fedorinov, A. V. Satonin, Je. P. Gribkov; Donbas. gos. mashinostroit. akad. – Kramatorsk, 2010. – 243 p.

Надійшла (received) 28.10.2014

УДК 621.73.02

А. А. ЛИПЧАНСКИЙ, аспирант, ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫТЯЖНОГО РЕБРА МАТРИЦЫ НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ШТАМПОВКЕ ДНИЩ

Представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния при вытяжке днищ в матрице с вытяжным ребром. Использован пакет конечно-элементного анализа DeForm-2D. Установлено распределение логарифмической деформации, интенсивность деформации и интенсивности напряжения в заготовке при вытяжке с прижимом. Отмечено, что предлагаемая методика расчета горячей листовой штамповки днищ позволяет более достоверно прогнозировать появление признаков брака при проектировании технологических операций листовой штамповки.

Ключевые слова: моделирование, напряженно-деформированное состояние, заготовка, матрица, вытяжное ребро.

Введение. К числу наиболее важных оболочковых деталей машиностроения относятся крупногабаритные тонкостенные днища двойной кривизны сферообразной, эллиптической, куполообразной и других форм, большинство которых изготавливается способами листовой штамповки на прессах, что объясняется высокой производительностью данного метода и наличием значительного парка прессового оборудования в стране.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время разработано достаточно много способов изготовления крупногабаритных днищ. К одному из наиболее часто используемых способов можно отнести горячую штамповку с применением верхнего прижима, устанавливаемого для предупреждения образования складок на верхнем участке заготовки, находящемся за пределами рабочего скругления матрицы, т. е. на участке, называемом фланцем заготовки. Во многих случаях рабочие поверхности прижимного кольца и матрицы выполняются плоскими, однако, такая конструкция не позволяет штамповать тонкостенные днища большого диаметра за один переход.

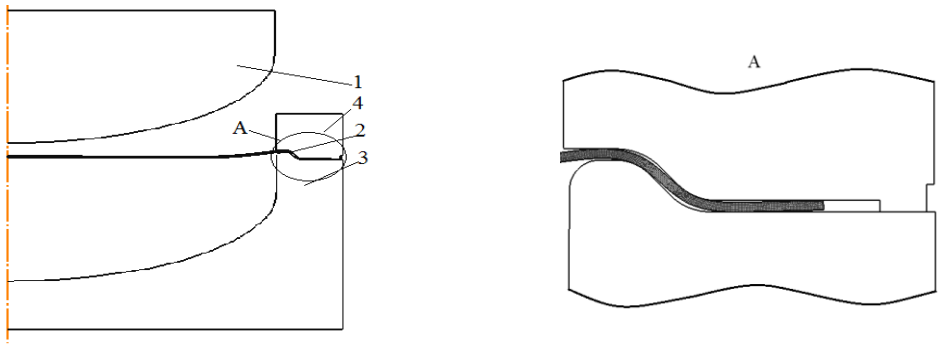
Нами предложено изготавливать днища за один переход используя матрицу с вытяжным ребром (рис. 1). Конструкции подобного типа применяют при вытяжке полусферических днищ [2, 3]. Предложенная конструкция матрицы позволяет штамповать днища толщиной 10 мм и диаметром 3200 мм за один переход без контроля силы прижима, так как прижимное кольцо только изгибает фланец заготовки, а на конечной стадии прижима остается зазор между прижимным кольцом и матрицей.

© А. А. Липчанский, 2014

Как показывают работы [4–7] достаточно актуальным являются исследование технологических параметров изготовления днищ, основным из которых является напряженно-деформированное состояние. Анализ производственных наблюдений показал, что при горячей листовой штамповке днищ на наружной поверхности заготовки образуются риски, что может повлечь к дальнейшему ухудшению качества изготавливаемой продукции и браку готовых изделий. Для решения данной проблемы важно знать величину напряженно-деформированного состояния в заготовке. Однако, в литературе отсутствуют данные о влиянии вытяжного ребра матрицы на величину напряженно-деформированного состояния в заготовке при горячей листовой штамповке днищ.

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния металла заготовки и силовых режимов ее деформирования при горячей листовой штамповке днищ.

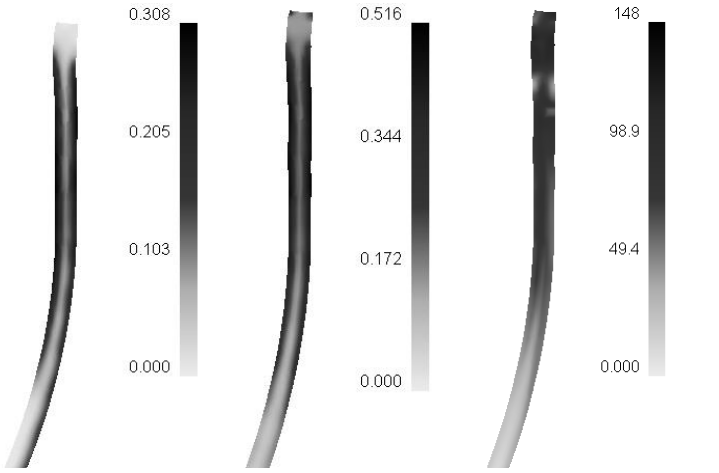
Изложение основного материала. Исследование проводили, используя пакет конечно-элементного анализа DeForm-2D. Объектом моделирования был процесс вытяжки пуансоном 1 листовой заготовки 2 в полость матрицы 3 с использованием прижимного кольца 4 с вытяжным ребром (рис. 1). Применяли заготовку из стали 09Г2С с диаметром D = 3800 мм и толщиной S = 10 мм. Для этого предварительно в программном комплексе КОМПАС были построены физические модели рабочего инструмента. Матрица была выполнена, согласно технологии, с вытяжным ребром. Из библиотеки программы был подобран аналог стали, близкий по химическому составу и механическим свойствам. Температурные условия принимали изотермическими. Анализ производственных наблюдений показал, что заготовку нагревают в камерной печи до температуры 950°С. Время транспортировки манипулятором заготовки от печи к прессу составляет 50–60 с. За это время заготовка остывает, поэтому начальная температура заготовки перед штамповкой была принята равной 800°С. Вытяжка заготовки происходит в две стадии: перегиб листовой заготовки для создания натяжения металла за счет силы прижимного кольца что в свою очередь создает имитацию процесса обратной вытяжки и вытяжка непосредственно пуансоном.



а *б*

Рис. 1 – Схема вытяжки заготовки: 1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица; 4 – прижимное кольцо

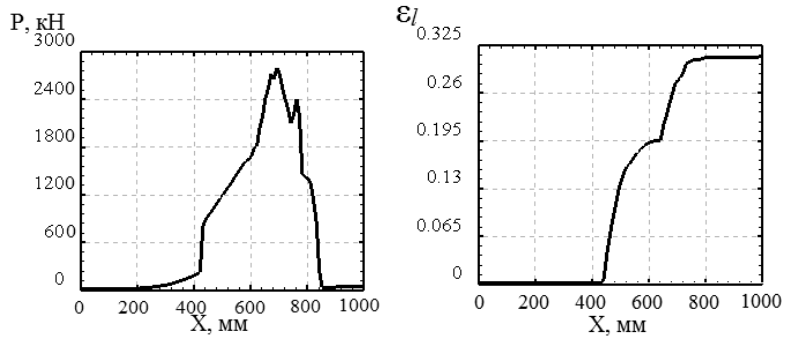
В результате моделирования получены результаты распределения логарифмической деформации, интенсивности деформации и интенсивности напряжений в заготовке после ее деформирования. На рис. 2, а приведено распределение логарифмической деформации в торцевой зоне заготовки на конечной стадии вытяжки. Как показывает анализ, максимальная вероятность разрушения сосредоточена во фланце заготовки на внутренней и внешней поверхности и на внешней переходной поверхности к эллипсоиду, максимальное значение логарифмической деформации достигает 0,308.



а *б* *в*

Рис. 2 – Распределение напряжений и деформаций во фланце заготовки на конечной стадии вытяжки: а – логарифмической деформации; б – интенсивность деформации; в – интенсивность напряжения

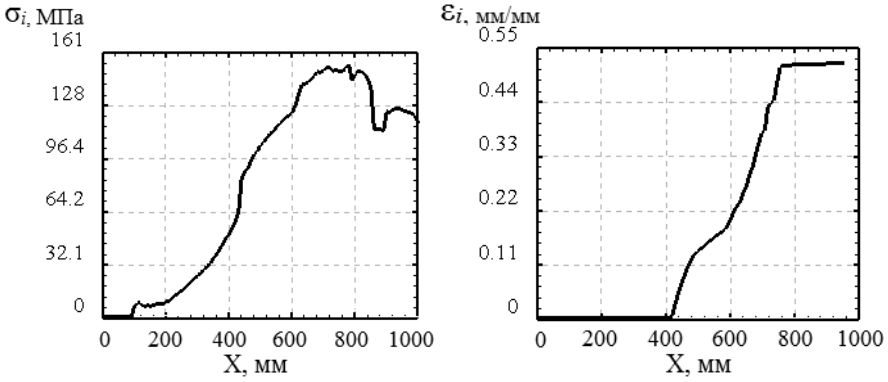
Рис. 2, б показывает распределение интенсивности деформации в торцевой зоне заготовки. Максимальная интенсивность деформации сосредоточена на обеих поверхностях фланцевой зоны и составляет 0,516. Интенсивность напряжения, изображенная на рис 2, с, показывает, что напряжения, возникающие во фланце заготовки, распределяются равномерно и достигают максимальной отметки в 148 МПа.



а *б*

Рис. 3 – Зависимость: а – силы вытяжки Р от перемещения пуансона Х;
б – логарифмической деформации ε_l от перемещения пуансона Х

По результатам исследований построены графики зависимости силы вытяжки P пунсоном заготовки от его перемещения X (рис. 3, а), зависимость логарифмической деформации ε_l от перемещения пуансона X (рис. 3, б), зависимость интенсивность напряжения σ_i от перемещения пуансона Х (рис. 4, а) и зависимость интенсивность деформации ε_i от перемещения пуансона X (рис. 4, б). Анализ графика, приведенного на рис. 3, а показывает, что с увеличением перемещения пуансона сила возрастает до 2800 кН что связано с вытяжкой фланца заготовки из области перегиба вытяжным ребром, после чего сила падает. График, приведенный на рис. 3, б показывает, что вероятность разрушения значительно возрастает на полпути от общего перемещения пуансона и достигает максимума в 0,308 на конечном этапе штамповки. Из графика, представленного на рис. 4, а видно, что с увеличением перемещения пуансона интенсивность напряжений возрастает и достигает 148МПа, однако, на конечной стадии штамповки уменьшается и достигает 120 МПа. График зависимости интенсивности деформации от перемещения (рис. 4, б) показывает, что после перемещении пуансона половины путь интенсивность деформации возрастает и достигает отметки в 0,51.



а *б*

Рис. 4 – Зависимость: а – интенсивность напряжения σ_i от перемещения пуансона Х;
б – интенсивность деформации ε_i от перемещения пуансона Х

Анализ полученных результатов показал, что предлагаемая технология является перспективной за счет применения матрицы, выполненной с вытяжным ребром. Использование данной технологии позволит уменьшить количество переходов и повысить производительность.

Выводы. Установлено распределение логарифмической деформации, интенсивность деформации и интенсивности напряжения в заготовке при вытяжке с прижимом. Предлагаемая методика расчета горячей листовой штамповки днищ позволяет более достоверно прогнозировать появление признаков брака при проектировании технологических операций листовой штамповки.

Список литературы: 1. Мошнин Е.Н. Технология штамповки крупногабаритных деталей / Е.Н. Мошнин. – М.: Машиностроение, 1973. – 240 с. **2.** Попов Е.А. Технология и автоматизация листовой штамповки / Е.А. Попов, В.Г. Ковалев, И.Н. Шубин. – М.: Изд–во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 480 с. **3.** Зубцов М.Е. Листовая штамповка / М.Е. Зубцов. – 3–е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с. **4.** Фомичев А.Ф. Компьютерное исследование технологических параметров при штамповке / А.Ф. Фомичев, Э.Е. Юргенсон, С.Ю. Панин // Кузнечно–штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2010. – № 8. – С. 38–42. **5.** Мовшович И.Я. Опыт штамповки тонкостенных сферических днищ на гидравлических прессах / И.Я. Мовшович, В.И. Бер // Кузнечно–штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2008. – № 3. – С. 27–29. **6.** Ромашко Н.И. Технология изготовления крупногабаритных толстых плит и вытяжка бесшовных днищ большого диаметра / Н.И. Ромашко, А.Г. Токарев, О.А. Кобелев // Кузнечно–штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 7. – С. 22–26. **7.** Демин В.А. Горячая листовая штамповка днищ / В.А. Демин // Кузнечно–штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2002. – № 8. – С. 16–18.

Bibliography (transliterated): 1. Moshnin E.N. Tehnologija shtampovki krupnogabaritnyh detalej E.N. Moshnin. – Moscow: Mashinostroenie, 1973. – 240 p. **2.** Popov E.A. Tehnologija i avtomatizacija listovoj shtampovki E.A. Popov, V.G. Kovalev, I.N. Shubin. – Moscow: Izd–vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2000. – 480 p. **3.** Zubcov M.E. Listovaja shtampovka M.E. Zubcov. – 3–e izd., pererab. i dop. – Leningrad: Mashinostroenie, 1980. – 432 p. **4.** Fomichev A.F. Komp'juternoe issledovanie tehnologicheskih parametrov pri shtampovke A.F. Fomichev, Je.E. Jurgenson, S.Ju. Panin Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – 2010. – No 8. – P. 38–42. **5.** Movshovich I.Ja. Opyt shtampovki tonkostennyh sfericheskih dnishh na gidravlicheskih pressah I.Ja. Movshovich, V.I. Ber Kuznechno–shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem. – 2008. – No 3. – P. 27–29. **6.** Romashko N.I. Tehnologija izgotovlenija krupnogabaritnyh tolstyh plit i vytjazhka besshovnyh dnishh bol'shogo diametra N.I. Romashko, A.G. Tokarev, O.A. Kobelev Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – 2008. – No 7. – P. 22–26. **7.** Demin V.A. Gorjachaja listovaja shtampovka dnishh V.A. Demin Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. – 2002. – No 8. – P. 16–18.

Поступила (received) 28.10.2014

УДК 621.771.26.001

В. С. МЕДВЕДЕВ, докт. техн. наук, ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», Харьков;
Е. В. БАЗАРОВА, ассистент, ДонГТУ;
В. А. ШПАКОВ, канд. техн. наук, доц., ДонГТУ, Алчевск

ВЛИЯНИЕ ОБЖАТИЯ СТЕНКИ НА ИЗМЕНЕНИЕ ВЫСОТЫ ФЛАНЦЕВ В ЧЕРНОВЫХ ЗАКРЫТЫХ БАЛОЧНЫХ КАЛИБРАХ

Приведены результаты математического моделирования течения металла в черновом закрытом балочном калибре методом конечных элементов. Показано распределение напряжений, перемещений и деформаций в поперечном сечении прокатываемого профиля. Установлено, что с повышением обжатия стенки общая высота полок уменьшается. Высота открытых и закрытых фланцев увеличивается. Интенсивность роста приращения высоты закрытых фланцев меньше, чем открытых. Для получения двутавровых профилей с высокими фланцами прокатку необходимо вести с интенсивной деформацией стенки в черновых калибрах.

Ключевые слова: балочный калибр, математическая модель, деформация металла, приращение фланцев.

Введение. При прокатке двутавровых профилей первые черновые проходы осуществляются в разрезных балочных калибрах (открытых и закрытых). В этих проходах формируются стенка (шейка) и фланцы (полки) профиля. В последующих балочных калибрах они постепенно обжимаются до конечных размеров готового профиля. Практикой доказано, что от правильного расчета и конструирования разрезных калибров в большой степени зависит нормальное выполнение конечного профиля. Одним из основных вопросов, который стоит при разработке калибровок валков, является определение высотной деформации (утяжки или приращения) открытых и закрытых фланцев, которая зависит от многих технологических факторов, в том числе и от величины обжатия стенки в разрезных балочных калибрах.

В работах Чекмарева А.П., Литовченко Н.В., Жадана В.Т. и др. [1–3], посвященных калибровке валков для прокатки двутавров, даны рекомендации по построению балочных калибров, определению параметров деформации металла (коэффициентов вытяжки, обжатия и уширения стенки, бокового обжатия фланцев и др.). Величинами приращения или утяжки высоты открытых и закрытых фланцев задаются приблизительно, исходя из практических данных.

Бахтинов Б.П. и Штернов М.М. [4] утяжку и приращение фланцев рассчитывают по инженерным формулам, учитывающим особенности скоростного режима прокатки в закрытых балочных калибрах.

© В. С. Медведев, Е. В. Базарова, В. А. Шпаков, 2014

Смирнов В.К., Шилов В.А. и Инатович Ю.В. [5] получили расчетные формулы для определения коэффициентов деформации фланцев по высоте в открытых и закрытых ручьях калибров путем обобщения накопленного опыта проектирования калибровок валков и статистического анализа действующих режимов прокатки двутавровых профилей.

Высокий технический уровень современных персональных компьютеров с их большим объемом памяти и быстродействием позволил исследователям широко использовать методы математического моделирования прокатки в калибрах с применением вариационных принципов механики сплошных сред. Это дает возможность адекватно описывать течение металла в фасонных калибрах и получать достаточно точные данные по параметрам формоизменения и энергетике процесса. В настоящее время в основном используют вариационный метод с построением кинематически возможного поля скоростей [6] и метод конечных элементов [7].

Настоящая статья является продолжением проведенных авторами теоретических исследований течения металла в балочном калибре методом конечных элементов [8]. В этой работе на базе программного комплекса ABAQUS [9] была разработана конечно-элементная математическая модель, описывающая трехмерную задачу прокатки в закрытом балочном калибре, учитывающая термодинамические эффекты при деформации материала.

Целью данного исследования является определение влияния обжатия стенки на изменение высоты фланцев в черновых закрытых балочных калибрах.

Результаты исследований. Влияние обжатия стенки на высотную деформацию фланцев исследовали на теоретической модели прокатки двутавровой заготовки с толщиной стенки 65,2 мм в закрытом балочном калибре (рис. 1) с толщиной стенки 47,5; 37,5 и 27,5 мм (толщину стенки изменяли путем опускания верхнего валка). Обжатие стенки составляло 17,7; 27,7 и 37,7 мм.

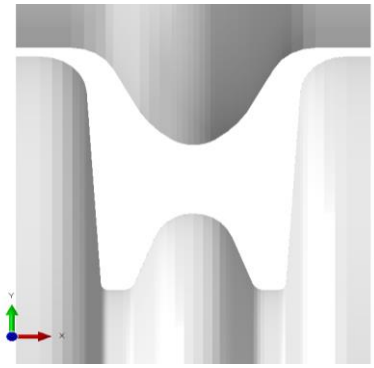
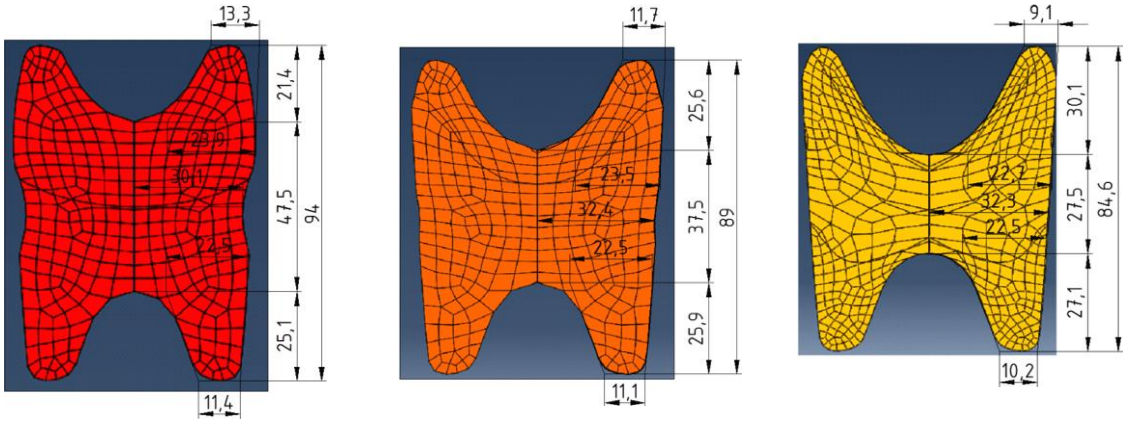


Рис. 1 – Черновой закрытый балочный калибр

Расчетные поперечные сечения полос, полученные путем математического моделирования прокатки двутавровой заготовки с варьированием обжатия стенки, приведены на рис. 2, а основные параметры формоизменения в табл. 1.



а б в

Рис. 2 – Размеры поперечного сечения полосы после прокатки: а – обжатие по стенке 17,7 мм (толщина стенки 47,5 мм); б – обжатие по стенке 27,7 мм (толщина стенки 37,5 мм); в – обжатие по стенке 37,7 мм (толщина стенки 27,5 мм)

Размеры заготовки – толщина и ширина стенки $d = 65{,}2$ мм, $b_к$ = 56,8 мм; открытый фланец $h_о$ = 16,3 мм, $a_о$ = 10,2 мм, $b_о$ = 23,9 мм; закрытый фланец $h_з$ = 21,1 мм, $a_з$ = 12,1 мм, $b_з$ =24,1 мм; высота заготовки H = 102,6 мм.

Размеры закрытого балочного калибра при толщине стенки $d = 27{,}5$ мм: ширина стенки $b_к$ = 65 мм; открытый фланец $h_о$ = 30,75 мм, $a_о$ = 9 мм, $b_о$ = 21 мм; закрытый фланец $h_з$ = 30,75 мм, $a_з$ = 9,75 мм, $b_з$ = 22,5 мм; высота калибра H = 89 мм. Начальный диаметр валков 340 мм (калибровка валков приведена в работе [10]).

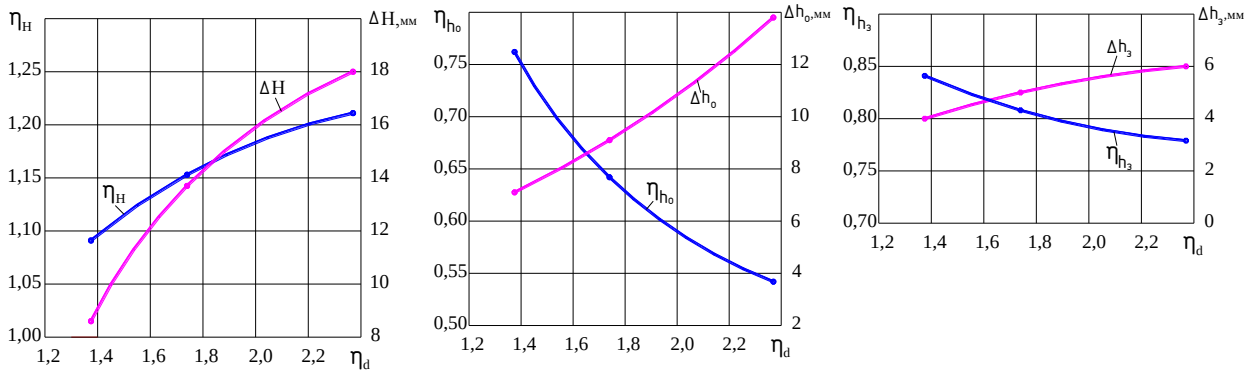
Таблица 1. Формоизменение металла при прокатке в черновом закрытом балочном калибре (в заготовке ширина стенки равна ее толщине $B/d = 1$)

№ образцов	Размеры поперечного сечения полосы после прокатки				Деформации							
					стенка		полка		открытый фланец		закрытый фланец	
	d, мм	H, мм	h_o, мм	$h_з$, мм	Δd, мм	η_d	ΔH, мм	η_H	Δh_o, мм	η_{ho}	$\Delta h_з$, мм	$\eta_{hз}$
Загот.	65,2	102,6	16,3	21,1								
1	47,5	94,0	21,4	25,1	17,7	1,373	8,6	1,091	5,1	0,762	4,0	0,841
2	37,5	89,0	25,6	25,9	27,7	1,739	13,7	1,153	9,3	0,637	4,8	0,815
3	27,5	84,7	30,1	27,1	37,7	2,371	18,0	1,211	13,8	0,542	6,0	0,779

Здесь: d – толщина стенки, H – высота полки, h_o – высота открытого фланца, $h_з$ – высота закрытого фланца.

Деформация металла характеризовалась следующими величинами: $\Delta d = d - d'$ – обжатие стенки; $\eta_d = d / d'$ – коэффициент обжатия стенки по толщине; $\Delta H = H - H'$ – утяжка полки; $\eta_H = H / H'$ – коэффициент высотной деформации полки; $\Delta h_o = h'_o - h_o$ – абсолютное приращение высоты открытого фланца; $\eta_{ho} = h_o / h'_o$ – коэффициент высотной деформации открытого фланца; $\Delta h_з = h'_з - h_з$ – абсолютное приращение высоты закрытого фланца; $\eta_{hз} = h_з / h'_з$ – коэффициент высотной деформации закрытого фланца.

В результате проведенных исследований установлено, что в черновых закрытых балочных калибрах при увеличении деформации стенки η_d с 1,373 до 2,371 уменьшается общая высота полок H, а открытый и закрытый фланцы получают интенсивное приращение высоты (рис. 3). Утяжка полок ΔH возрастает с 8,6 до 18,0 мм, т.е в 2,1 раза, при этом коэффициент высотной деформации полок η_H увеличивается с 1,091 до 1,211 (рис. 3, а). Приращение высоты открытых фланцев Δh_o возрастает с 5,1 до 13,8 мм, т.е. в 2,71 раза, при этом коэффициент высотной деформации открытого фланца η_{ho} уменьшается с 0,762 до 0,542 (рис. 3, б). Интенсивность роста приращения высоты закрытых фланцев меньше, чем открытых. Так, $\Delta h_з$ возрастает с 4 до 6 мм, т.е. в 1,5 раза, а коэффициент $\eta_{hз}$ уменьшается с 0,841 до 0,779 (рис. 3, в).



а б в

Рис. 3 – Влияние обжатия стенки на высотную деформацию фланцев в черновом закрытом балочном калибре: *а* – зависимость высотной деформации полок η_H и ΔH от обжатия стенки η_d; б – зависимость высотной деформации открытых фланцев η_{ho} и Δh_o от обжатия стенки η_d; в – зависимость высотной деформации закрытых фланцев $\eta_{hз}$ и $\Delta h_з$ от обжатия стенки η_d

При увеличении обжатия стенки существенно изменяется напряженно-деформированное состояние металла. Изменяются не только абсолютные значения деформаций и напряжений, но и характер их распределения в очаге деформации. На рис. 4–6 приведены поле распределения эквивалентных напряжений по Мизесу (установившееся состояние) в поперечном и

продольном сечениях полосы *S* (позиции «а» и «б») и соответствующие эпюры перемещений *U*1 и *U*3 (позиции «в» и «г»).

Так, эквивалентные напряжения в стенке по мере увеличения ее обжатия с 17,7 до 37,7 мм возрастают с +26,2…+43,3 до +42,2…+73,8 МПа. При малом обжатии область максимальных напряжений локализуется в стенке со стороны разрезающего гребня открытого ручья валка. При максимальном обжатии эта область распространяется на все поперечное сечение стенки, захватывая и объемы металла, примыкающие к внутренним поверхностям открытых и закрытых фланцев. Область наиболее низких напряжений (до 10,3 МПа) располагается при малых обжатиях стенки на концах открытых и закрытых фланцев, а при больших обжатиях – в объемах металла, примыкающих к наружным (боковым) поверхностям фланцев и стенки. При этом в открытых фланцах напряжения в 4 раза больше, чем в закрытых. В середине стенки максимальные напряжения достигают 31,6 МПа.

Распределение перемещений по поперечному сечению профиля также зависит от величины обжатия стенки. Во всем диапазоне изменения обжатий стенки наибольшие перемещения наблюдаются в области оснований открытых фланцев и составляют +4,7…+7,0 мм (максимальное перемещение при $\Delta d = 37{,}7$ м). На концах открытых фланцев перемещения находятся в пределах +2,9…+5,1 мм. В закрытых фланцах перемещения существенно ниже, чем в открытых. Наименьшие перемещения на концах закрытых фланцев –0,5 мм. Перемещения в стенке не превышают 5,1 мм.

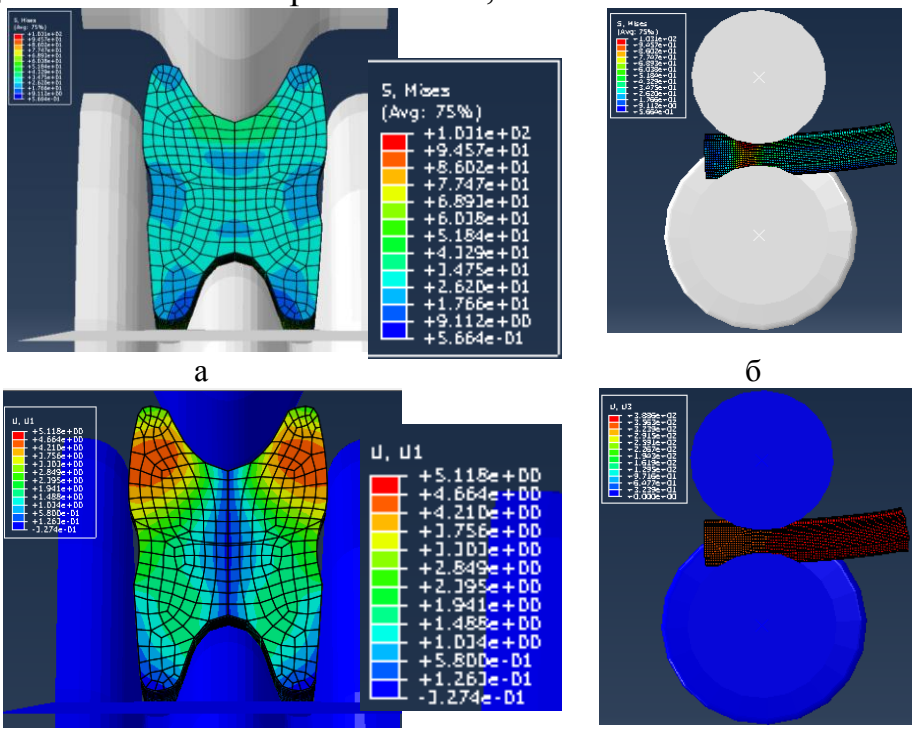


Рис. 4 – Напряженно-деформированное состояние металла в закрытом балочном калибре при абсолютном обжатии стенки $\Delta d = 17{,}7$ мм

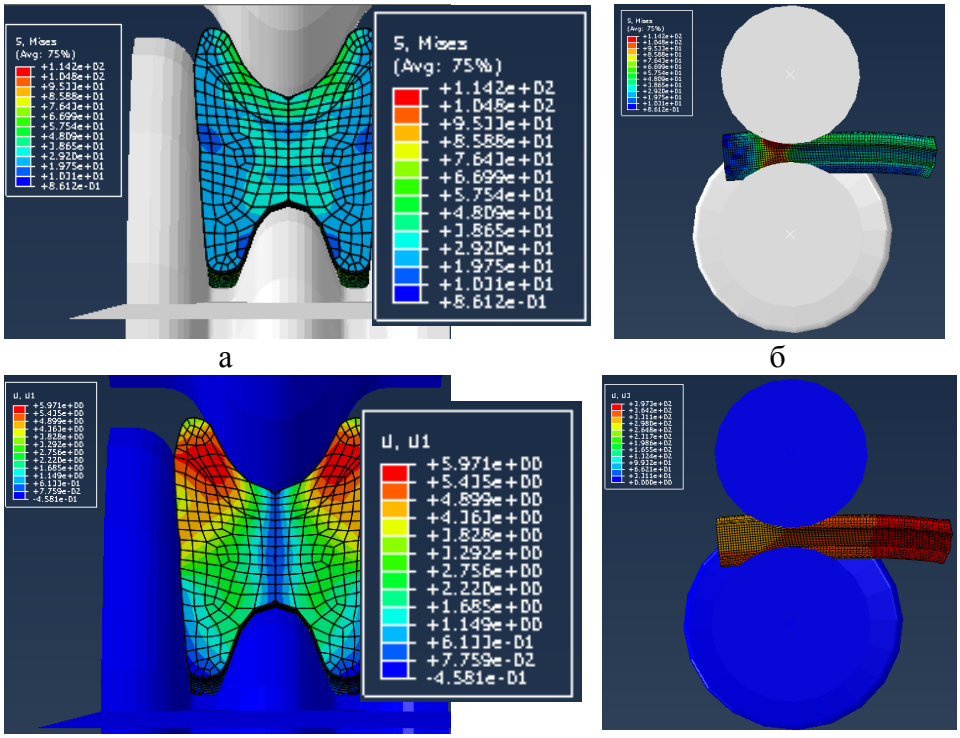


Рис. 5 – Напряженно-деформированное состояние металла в закрытом балочном калибре при абсолютном обжатии стенки $\Delta d = 27,7$ мм

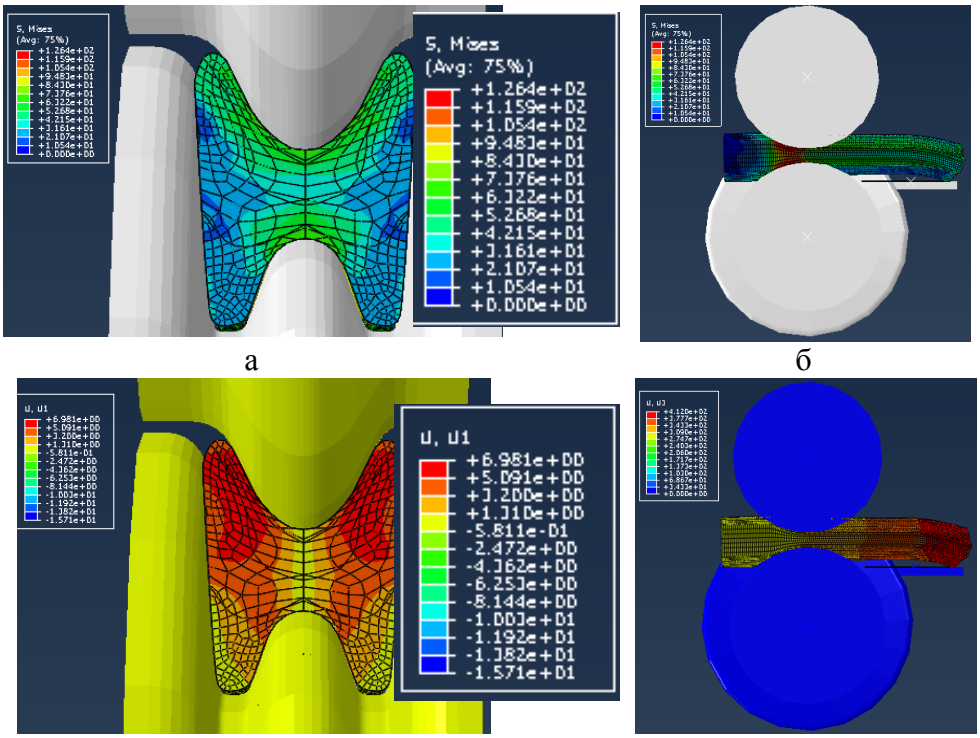


Рис. 6 – Напряженно-деформированное состояние металла в закрытом балочном калибре при абсолютном обжатии стенки $\Delta d = 37,7$ мм

Распределение логарифмических деформаций в поперечном сечении профиля вдоль оси Y(e_1) и оси X(e_2) крайне неравномерно и зависит от величины обжатия стенки. При этом во всем диапазоне изменения обжатий стенки наблюдается качественно одинаковый характер распределения e_1 и e_2.

Деформации e_1 по высоте профиля на участках стенки, прилегающих к открытому и закрытому разрезающим гребням валков, больше, чем по середине стенки. Причем в направлении от поверхностей гребней к горизонтальной оси стенки e_1 сначала несколько возрастают до своего максимального значения, а затем уменьшаются до минимума. На участках полок максимальные значения e_1 относятся к концам открытых фланцев, а минимальные значения к концам закрытых. По ширине профиля деформации e_1 плавно уменьшаются от оси калибра к полкам. Некоторое увеличение e_1 имеет место у наружных граней полок, что связано с активным действием контактных сил трения.

Максимальное значение деформации e_2 располагается на оси симметрии калибра. По ширине калибра e_2 уменьшаются от середины к наружным граням полок. Минимальные значения деформации e_2 наблюдаются на концах закрытых фланцев. По толщине стенки деформации e_2 уменьшаются в направлении от гребней к ее горизонтальной оси.

Установленный методом конечных элементов характер распределения деформаций e_1 и e_2 подтверждается экспериментальными исследованиями течения металла в закрытом балочном калибре [10].

Анализ характера распределений деформаций и интегральных характеристик формоизменения металла показывает, что погрешность в абсолютных значениях приращения высоты открытого и закрытого фланцев составила 9,5 и 25,0 % соответственно. Погрешность в утяжке общей высоты профиля 5,3 %. Максимальная разница в приращении высоты открытого фланца равна 1,2 мм, закрытого 2,0 мм, а общей высоты профиля 0,9 мм. Это вполне допустимо при проектировании калибровок валков для прокатки двутавровых балок.

Из анализа результатов теоретических исследований следует важный для практики вывод: для получения двутавровых профилей с высокими фланцами прокатку необходимо вести с интенсивной деформацией стенки в черновых калибрах. На основании проведенных исследований разработаны предложения по совершенствованию технологии прокатки и калибровок валков двутавровых балок № 14 на крупносортном стане 600 ПАО «АМК».

Выводы. В результате теоретического исследования течения металла в закрытом разрезном балочном калибре методом конечных элементов установлено, что с повышением обжатия стенки общая высота полок

уменьшается, а высота открытых и закрытых фланцев увеличивается. Приращение высоты открытых фланцев больше, чем закрытых. Для получения двутавровых профилей с высокими фланцами прокатку необходимо вести с интенсивным обжатием стенки в черновых калибрах. Адекватность разработанной теоретической модели реальным процессам прокатки подтверждена сравнением результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными.

Список литературы: 1. *Жадан В.Т.* Производство двутавровых балок / *В.Т. Жадан, Г.Д. Фейгин, И.М. Герман.* – М. : Металлургия, 1972. – 192 с. **2.** *Литовченко Н.В.* Калибровка профилей и прокатных валков / *Н.В. Литовченко.* – М. : Металлургия, 1990. – 432 с. **3.** *Чекмарев А.П.* Калибровка прокатных валков / *А.П. Чекмарев, М.С. Мутьев, Р.А. Машковцев.* – М. : Металлургия, 1971. – 521 с. **4.** *Бахтинов Б.П.* Калибровка прокатных валков / *Б.П. Бахтинов, М.М. Штернов.* – М.: Металлургиздат, 1953. – 783 с. **5.** *Смирнов В.К.* Калибровка прокатных валков / *В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Инатович.* – М. : Металлургия, 1987. – 368 с. **6.** *Тарновский И.Я.* Элементы теории прокатки сложных профилей / *И.Я. Тарновский, А.Н. Скороходов, Б.М. Илюкович.* – М.: Металлургия, 1972. – 352 с. **7.** *Васидзу К.* Вариационные методы в теории упругости и пластичности: пер. с англ. / *К. Васидзу* – М.: Мир, 1987. – 542 с. **8.** *Медведев В.С.* Теоретическое исследование течения металла в закрытых балочных калибрах методом конечных элементов / *В.С. Медведев, П.В. Боровик, В.А. Шпаков, Е.В. Базарова* // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. Донбасской государственной машиностроительной академии. – Краматорск: ДГМА, 2014. – №1(38). – С. 166–172. **9.** *Боровік П.В.* Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів: Навч. посіб. / *П.В. Боровік*. – Алчевськ: ДонДТУ, 2012. – 170 с. **10.** *Медведев В.С.* Экспериментальное исследование течения металла в балочных калибрах / *В.С. Медведев, В.А. Шпаков, Е.В. Базарова* // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. праць – Луганськ : вид–во СНУ ім. В. Даля. 2013. – № 1 (14). – С. 52–61.

Bibliography (transliterated): 1. *Zhadan V.T.* Proizvodstvo dvutavrovyh balok *V.T. Zhadan, G.D. Fejgin, I.M. German* – Moscow: Metallurgija, 1972. – 192 P. **2**. *Litovchenko N.V.* Kalibrovka profilej i prokatnyh valkov *N.V. Litovchenko.* – Moscow: Metallurgija, 1990. – 432 P. **3**. *Chekmarev A.P.* Kalibrovka prokatnyh valkov *A.P. Chekmarev, M. P. Mut'ev, R.A. Mashkovcev.* – Moscow: Metallurgija, 1971. – 521 P. **4.** *Bahtinov B.P.* Kalibrovka prokatnyh valkov *B.P. Bahtinov, M.M. Shternov.* – Moscow: Metallurgizdat, 1953. – 783 P. **5.** *Smirnov V.K.* Kalibrovka prokatnyh valkov *V.K. Smirnov, V.A. Shilov, Ju.V. Inatovich.* – Moscow: Metallurgija, 1987. – 368 P. **6.** *Tarnovskij I.Ja.* Jelementy teorii prokatki slozhnyh profilej *I.Ja. Tarnovskij, A.N. Skorohodov, B.M.. Iljukovich.* – Moscow: Metallurgija, 1972. – 352 P. 7. *Vasidzu K.* Variacionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti: per. s angl. *K. Vasidzu* – Moscow: Mir, 1987. – 542 P. **8.** *Medvedev V. S.* Teoreticheskoe issledovanie techenija metalla v zakrytyh balochnyh kalibrah metodom konechnyh jelementov *V. P. Medvedev, P.V. Borovik, V.A. Shpakov, E.V. Bazarova* Obrabotka materialov davleniem: sb. nauch. tr. Donbasskoj gosudarstvennoj mashinostroitel'noj akademii. – Kramatorsk: DGMA, 2014. – No1(38). – P. 166–172. **9.** *Borovik P.V.* Teoretychni doslidzhennja procesiv obrobky metaliv tyskom na osnovi metodu skinchenyh elementiv: Navch. posib. *P.V. Borovik.* – Alchevs'k: DonDTU, 2012. – 170 P. **10.** *Medvedev V. S.* Jeksperimental'noe issledovanie techenija metalla v balochnyh kalibrah *V. S. Medvedev, V.A. Shpakov, E.V. Bazarova* Resursozberigajuchi tehnologii' vyrobnyctva ta obrobky tyskom materialiv u mashynobuduvanni: zb. nauk. prac' – Lugans'k: vyd–vo SNU im. V. Dalja. 2013. – No 1 (14). – P. 52–61.

Поступила (received) 26.10.2014

УДК 621.98.04

В. Я. МІРЗАК, ст. викладач, КНТУ;
В. М. БОКОВ, доц., канд. техн. наук, КНТУ, Кіровоград

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РОЗДІЛОВОГО ТОНКОЛИСТОВОГО ШТАМПУВАННЯ

Експериментально доведено, що при штампуванні пластин ротора встановлення штампа на механічний компенсатор похибок системи «прес-штамп», порівняно із встановленням його без компенсатора, суттєво підвищує якість штампування, зокрема висота задирки зменшується за зовнішнім контуром на 93 % та за внутрішнім – на 45 %. Отриманий результат підтверджує доцільність використання механічних компенсаторів похибок системи «прес-штамп» з метою підвищення якості розділового тонколистового штампування.

Ключові слова: механічний компенсатор, якість розділового тонколистового штампування, величина задирки, джерело похибок, пластини ротора, динамічне підстроювання.

Вступ. Експлуатаційні характеристики електротехнічних, радіотехнічних та електронних виробів із тонколистового матеріалу в великій мірі залежать від якості останніх, зокрема від точності штампування та величині задирки. Так, наприклад, похибки внутрішнього та зовнішнього діаметрів пластин магнітопроводів в електродвигунах приводять до нерівномірності повітряного зазору між статором та ротором, а наявність задирки та її нерівномірність розташування по контуру розділення приводить до погіршення електромагнітних характеристик набраного пакету. Тому виникає потреба в їх додатковій непродуктивній чистовій механічній обробки або застосуванні штампувальних операцій зачищення. В результаті систематизованого аналізу (рис. 1) причинно-наслідкових зв’язків втрати якості тонколистового розділового штампування, авторами роботи доведено, що джерелом біля 60 % похибок є система «прес-штамп». Існує багато пристроїв компенсації похибок системи «прес-штамп», але їх ефективність при штампуванні деталей підвищеної точності (7-й, 6-й квалітети) є недостатньою. В роботі пропонується та розвивається ідея про можливість використання механічних компенсаторів для суттєвого зменшення даних похибок.

Тому підвищення якості тонколистового розділового штампування із застосуванням механічних компенсаторів похибок системи «прес-штамп» є актуальною задачею, розв’язання якої дозволить зменшити собівартість виготовлення штампованих виробів, зокрема пластин магнітопроводів.

Аналіз останніх досліджень та літератури. В загальному випадку деформація L_x, L_y, L_z системи «прес-штамп» відбувається шляхом переміщення

© В. Я. Мірзак, В. М. Боков, 2014

їх елементів за осями x, y, z, а також шляхом їх повороту $П_x$, $П_y$, $П_z$ навколо цих осей. Тому, для створення «ідеального» компенсатора необхідно компенсувати усі можливі види деформації. Але в реальних умовах роботи компенсатора деформація системи в напрямку переміщення L_z за віссю z компенсується робочим переміщенням повзуна преса, а тому завжди автоматично забезпечується.

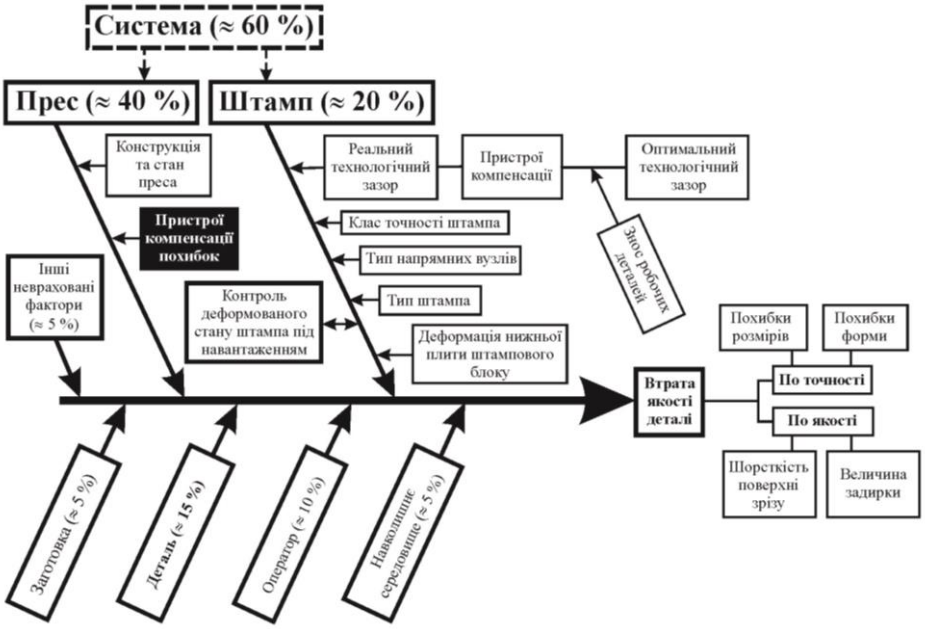


Рис. 1 – Діаграма причинно-наслідкових зв’язків втрати якості тонколистового розділового штампування

Компенсація деформації системи «прес-штамп» інших видів деформації (крім деформації переміщення L_z), може здійснюватися за допомогою з’єднань певних елементів компенсатора, так як одне з’єднання не може одночасно компенсувати усі види деформації. Так, нерухоме з’єднання не компенсує жодної деформації, крім L_z. Традиційно таке з’єднання широко застосовується для приєднання верхньої частини штампа до повзуна преса та нижньої частини штампа до підштампової плити. Відомі рухомі з’єднання елементів механічних компенсаторів компенсують деформації системи «прес-штамп» лише частково, а рухоме з’єднання, що характеризується плоскою опорою з проміжним еластичним середовищем [1–5], хоча і компенсує деформації переміщення L_x, L_y, L_z, є джерелом власних деформацій. Останні пов’язані з асиметричним навантаженням еластичним середовищем нижньої плити штампа відносно хвостовика при компенсації деформацій повороту $П_x$, $П_y$, $П_z$ і викликають значне радіальне навантаження напрямних вузлів. Саме тому технологічні можливості даного з’єднання суттєво обмежені зусиллям штампування та видом технологічної операції. Так, за даними роботи [6] пружний гумовий компенсатор, що має плоску опору з проміжним еластичним середовищем,

доцільно використовувати лише для формозмінних операцій холодного штампування, де вимоги щодо радіального навантаження напрямних вузлів прийнятні.

Із системного аналізу з'єднання елементів структури механічного компенсатора похибок системи «прес-штамп» виходить, що для компенсування усіх можливих видів деформацій достатньо використати два рухомих з'єднання. Дане технічне рішення реалізовано в механічному компенсаторі, що використовувався в роботі.

Мета дослідження, постановка проблеми. Вивчення впливу способу штампування пластини ротора (встановлення штампа на механічний компенсатор та без компенсатора) на якість штампування (висоту задирки).

Матеріали досліджень. Програмою експериментів передбачалося визначення розподілу задирки за висотою при встановленні штампа на компенсатор та без компенсатора. Відштамповані пластини ротора стапелювалися в окремі стопки в порядку їхнього виготовлення на пресі. На пластинах замірювалася висота задирки за внутрішнім та зовнішнім контурами в чотирьох точках через 90° (рис. 2).

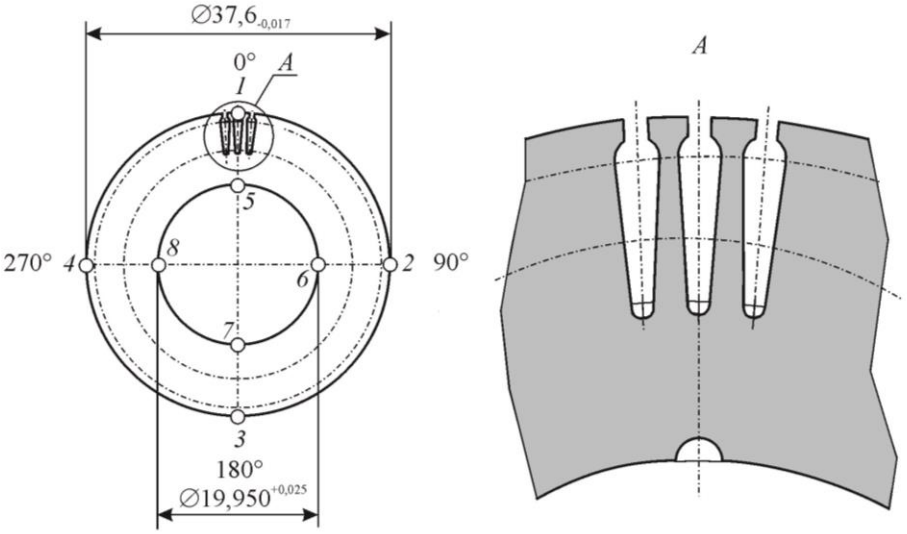


Рис. 2 – Схема виміру висоти задирки пластини ротора:

○ – точки, в яких виконувалися заміри

Вимірювання проводилося мікрометром-пасаметром з ціною поділки шкали 0,002 мм. Пластина ротора встановлювалася задирками вгору, а виміри проводилися в порядку, що зазначений номерами точок на схемі. Усього було обміряно по 180 деталей при різних схемах встановлення штампа. Результати вимірів статистично оброблялися в наступній послідовності:

– значення висоти задирок розбивали на вибірки, у які входило по 10 вимірів;

– визначали середнє значення вибірок за формулою

$$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i ,$$

де X_i – значення висоти задирки для *i*-го виміру; *n* – обсяг вибірки;

– для оцінки випадкової помилки окремого виміру розраховували значення середньоквадратичного відхилення σ за формулою

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \bar{X} \right)^2} ;$$

– визначали ширину довірчого інтервалу ΔX з довірчою вірогідністю $P = 0{,}95$

$$P\left(\bar{X} - \Delta X \right) < \bar{X} < \bar{X} + \Delta X , \; \Delta X = \frac{\sigma}{m} \cdot t ,$$

де *t* – критерій Стьюдента [31, с. 281]; *m* – математичне очікування;

– розміри, що не потрапили в довірчий інтервал, відкидалися. Розміри, що залишилися, підсумовувалися та знову визначалося середнє значення вибірки.

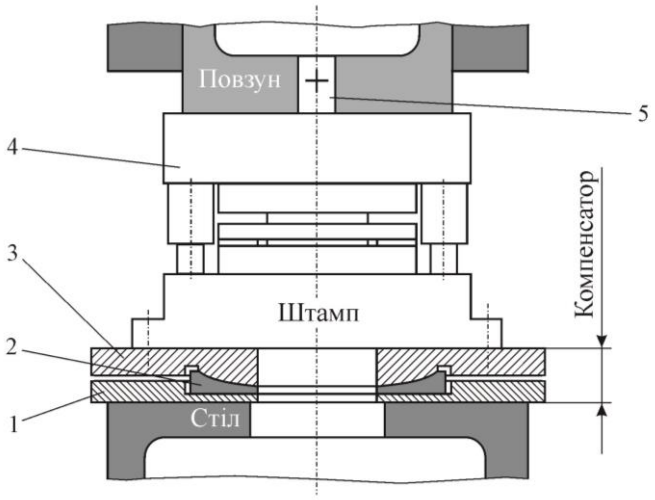


Рис. 3 – Принципова схема механічного компенсатора похибок системи «прес-штамп»:

1 – нижня плита; 2 – підп’ятник; 3 – верхня плита; 4 – штамп; 5 – хвостовик

З метою підвищення якості тонколистового розділового штампування, в роботі використовувався спосіб динамічного підстроювання, що запропонований авторами [7]. Суть способу полягає в тому, що штампування здійснюють з динамічним підстроюванням системи «прес-штамп» в напрямку збігання осі прикладання технологічного зусилля від пресу з віссю, що проходе через центр тиску штампа. Реалізація даного способу полягала в установленні штампа на механічний компенсатор похибок системи прес-штамп (рис. 3), який виконано з оптимальними геометричними параметрами [8].

Вплив механічного компенсатора на зміну висоти задирки. За даними дослідження побудовані залежності висоти задирки від номера вибірки при встановленні штампа на компенсатор та без компенсатора для різних точок (див. рис. 2) зовнішнього та внутрішнього контурів деталі (рис. 4.13–4.16) та залежність розподілу висоти задирки за периметром пластини ротора для зовнішнього (після операції вирубування) і внутрішнього (після операції пробивання) контурів при встановленні штампа на компенсатор та без компенсатора (рис. 4.17). Результати аналізу середньої висоти задирки для різних умов штампування наведені в таблиці.

Таблиця. Середня висота задирки в точках вимірювання за зовнішнім та внутрішнім контурами пластини ротора (див. рис. 2)

Спосіб встановлення штампів	Середня висота задирки, мкм							
	Точки зовнішнього контуру				Точки внутрішнього контуру			
	Т. 1	Т. 2	Т. 3	Т. 4	Т. 5	Т. 6	Т. 7	Т. 8
На компенсатор	21	9	13	15	23	16	19	21
Без компенсатора	31	29	21	29	38	26	25	27

Як бачимо, практично для всього периметра, як за зовнішнім, так і за внутрішнім контурами пластини ротора, спостерігається значне зниження висоти задирки при встановленні штампа на компенсатор у порівнянні з встановленням штампа без компенсатора. Так, для точок зовнішнього контуру середня висота задирки при встановленні штампа на компенсатор складає 14 мкм, а при встановленні без компенсатора – 27 мкм, що на 93 % більше. Для точок внутрішнього середня висота задирки при встановленні штампа на компенсатор складає 20 мкм, а при встановленні без компенсатора – 29 мкм, що на 45 % більше.

Зміна висоти задирки для різноманітних точок периметра відбувається нерівномірно. Це пояснюється нерівномірністю технологічного зазору за контуром, що виник у процесі складання штампа. Найменше значення висоти задирки спостерігається в точці 3 зовнішнього контуру (рис. 7). Очевидно, цей факт можна пояснити наявністю на даній ділянці контуру оптимального технологічного зазору.

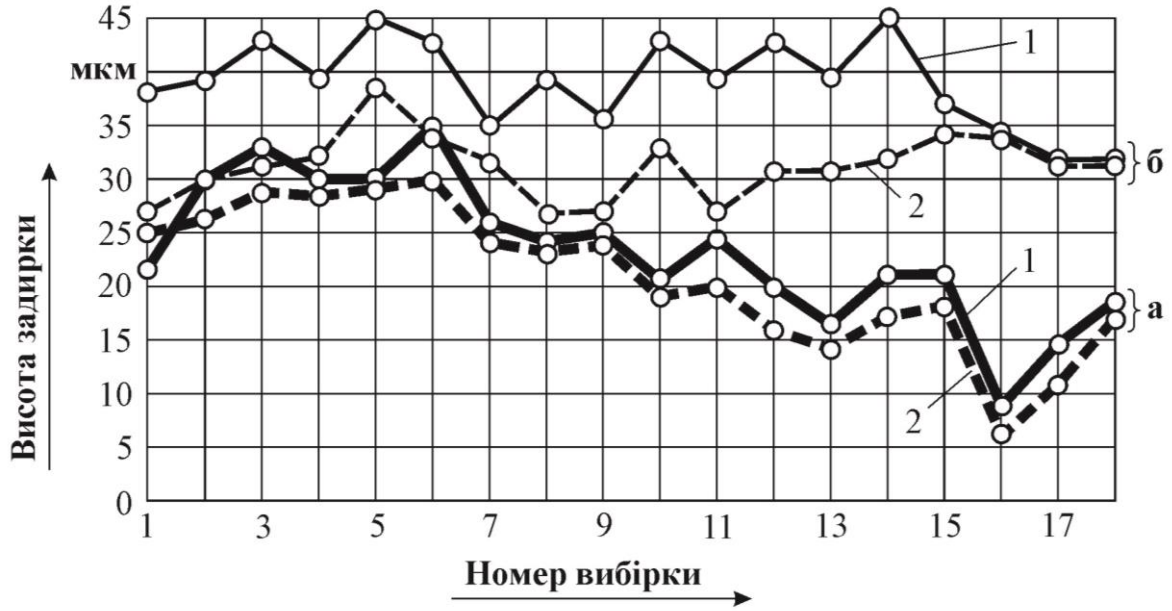


Рис. 4 – Залежність висоти задирки від номеру вибірки для зовнішнього (в точці 1) та внутрішнього (в точці 5) контурів пластини ротора:
а – при встановленні штампа на компенсатор; б – при встановленні штампа без компенсатора; 1 – внутрішній контур; 2 – зовнішній контур

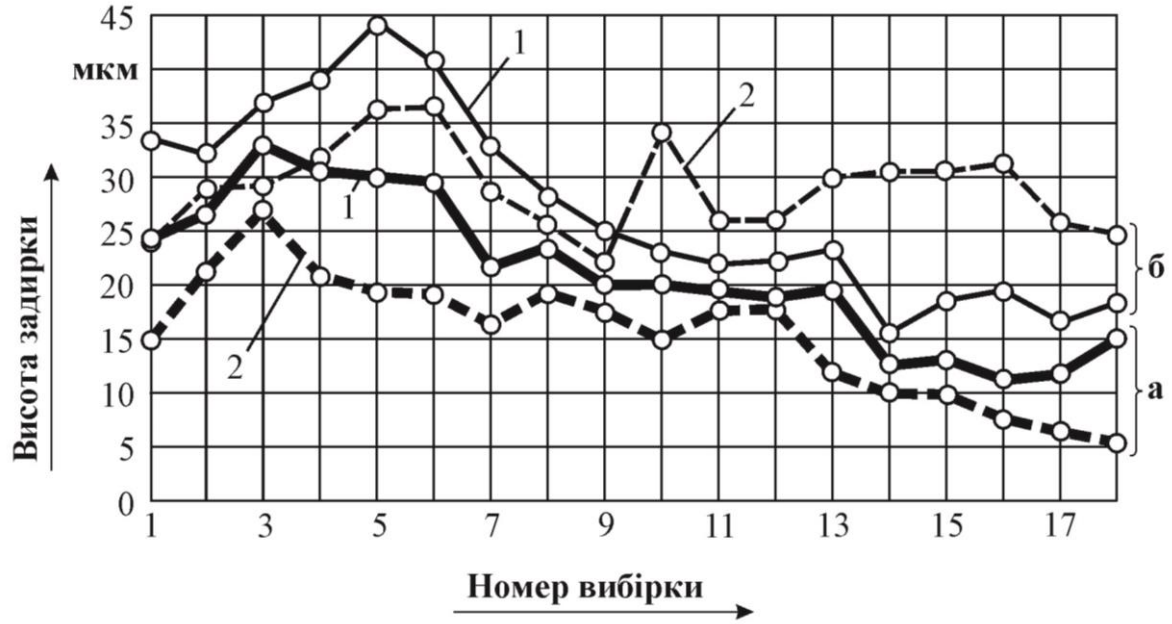


Рис. 5 – Залежність висоти задирки від номеру вибірки для зовнішнього (в точці 4) та внутрішнього (в точці 8) контурів пластини ротора:
а – при встановленні штампа на компенсатор; б – при встановленні штампа без компенсатора; 1 – внутрішній контур; 2 – зовнішній контур

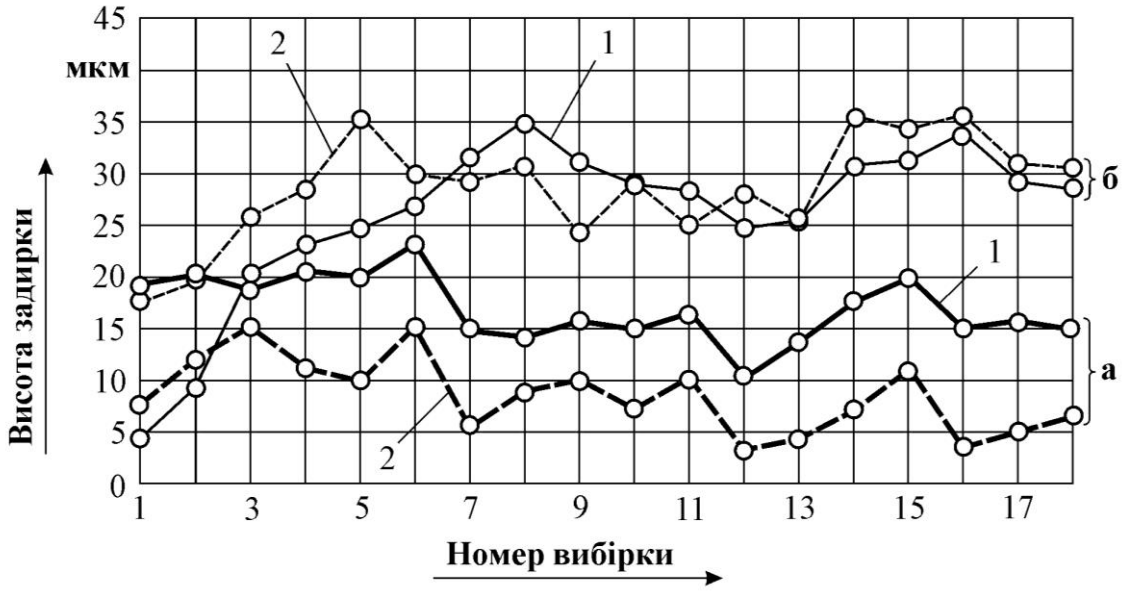


Рис. 6 – Залежність висоти задирки від номеру вибірки для зовнішнього (в точці 2) та внутрішнього (в точці 6) контурів пластини ротора:
а – при встановленні штампа на компенсатор; б – при встановленні штампа без компенсатора; 1 – внутрішній контур; 2 – зовнішній контур

Рис. 7 – Залежність висоти задирки від номеру вибірки для зовнішнього (в точці 3) та внутрішнього (в точці 7) контурів пластини ротора:
а – при встановленні штампа на компенсатор; б – при встановленні штампа без компенсатора; 1 – внутрішній контур; 2 – зовнішній контур

Розподіл висоти задирки від номера вибірки для зовнішнього і внутрішнього контуру при штампуванні з компенсатором та без нього для усіх точок, що вимірюються, ідентичне. Це пов'язано з тим, що переміщення

вирубних і пробивних робочих деталей штампа відбувається одночасно, за тим самим законом.

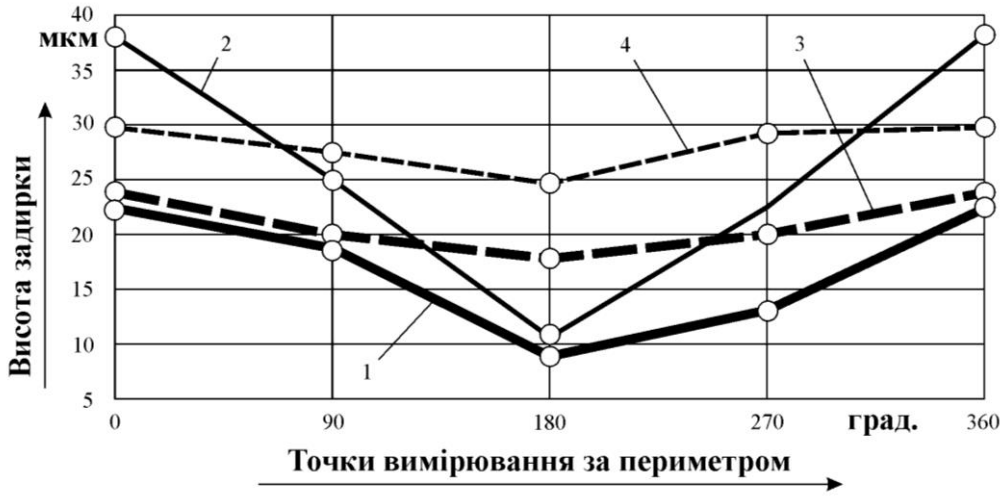


Рис. 8 – Розподіл висоти задирки за периметром пластини ротора:
1 – вирубування з компенсатором; 2 – вирубування без компенсатора; 3 – пробивання з компенсатором; 4 – пробивання без компенсатора

Розподіл висоти задирки за периметром контурів пластин, що вирубуються та пробиваються (рис. 8), більш рівномірний при встановленні штампа на компенсатор, що свідчить про зменшення амплітуди динамічного зазору.

Отриманий результат підтверджує доцільність використання механічних компенсаторів похибок системи «прес-штамп» з метою підвищення якості тонколистового розділового штампування.

Висновки. Експериментально виявлено значне зниження висоти задирки при встановленні штампа на механічний компенсатор у порівнянні з встановленням штампа без компенсатора при штампуванні пластин ротора за зовнішнім та внутрішнім контурами. Так, для точок зовнішнього контуру середня висота задирки при встановленні штампа на компенсатор зменшується на 93 %, а для точок внутрішнього контуру – на 45 %. Розподіл висоти задирки за периметром контурів пластин, що вирубуються та пробиваються, більш рівномірний при встановленні штампа на компенсатор, що свідчить про зменшення амплітуди динамічного зазору. Отриманий результат підтверджує доцільність використання механічних компенсаторів похибок системи «прес-штамп» з метою підвищення якості тонколистового розділового штампування.

Список літератури: 1. Пат. 837 Україна, МПК B21 D 37/00, B21 D 37/12. Компенсатор похибок напряму повзуна преса / *Діамантопуло К. К., Василевський О. В.*; власник Приазовський державний технічний університет. № 2000074079; заявл. 11.07.2000; опубл. 16.07.2001, Бюл. № 1. **2.** Пат. 11782 Україна, МПК B30 B 15/28. Компенсатор похибок напряму переміщення повзуна преса / *Діамантопуло К. К., Кухар В. В., Єрмолов Д. В.*; власник Приазовський державний технічний університет. № u200505677; заявл. 13.06.2005; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1. **3.** Пат. 24638 Україна,

МПК B21 D 37/00. Компенсатор похибок напряму повзуна пресів / *Діамантопуло К. К., Тихонський О. А., Кравченко Н. Є., Євтєєв А. І.*; власник Приазовський державний технічний університет. № u200701523; заявл. 13.02.2007; опубл. 10.07.2007, Бюл. № 10. **4.** Пат. 34270 Україна, МПК B21 D 37/00. Компенсатор похибок системи «прес-штамп» / *Діамантопуло К. К., Євтєєв А. І., Куриленко О. О.*; власник Приазовський державний технічний університет. № u200801335; заявл. 14.02.2008; опубл. 11.08.2008, Бюл. № 15. **5.** Пат. 34286 Україна, МПК B30 B 15/28, B21 B 23/00. Двошаровий пружний елемент компенсатора похибок напряму / *Кухар В. В., Діамантопуло К. К., Лаврентік О. О., Макєєв В. С., Балаєва О. Ю.*; власник Приазовський державний технічний університет. № u200806970; заявл. 20.05.2008; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22. **6.** *Балалаева Е. Ю.* Расчёт универсальных упругих компенсаторов погрешностей системы «пресс-штамп» для операции вытяжки-формовки / Е. Ю. Балалаева // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 193 – 198. **7.** Пат. 70346 Україна, МПК B26 F 1/40. Спосіб тонколистового розділового штампування в системі «прес-штамп» з беззазорним напрямком рухомої частини штампа відносно нерухомої / *Мірзак В. Я., Боков В. М.*; власник Кіровоградський національний технічний університет. № u201113040; заявл. 07.11.2011; опубл. 11.06.2012, Бюл. № 11. **8.** *Мірзак В. Я.* Моделювання показників міцності механічного компенсатора похибок системи «прес-штамп» із застосуванням метода скінченних елементів / *В. Я. Мірзак, В. М. Боков* // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету: техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Вип.. 27. – Кіровоград: КНТУ, 2014. – С. 3–12.

Bibliography (transliterated): 1. Pat. 837 Ukraina, MPK B21 D 3700, B21 D 3712. Kompensator poxybok naprjamu povzuna presa Diamantopulo K. K., Vasylevs'kyj O. V.; vlasnyk Pryazovs'kyj derzhavnyj texnichnyj universytet. No 2000074079; zajavl. 11.07.2000; opubl. 16.07.2001, Bul. No 1. **2.** Pat. 11782 Ukraina, MPK B30 B 1528, B21 D 3712. Kompensator poxybok naprjamu peremishenja povzuna presa Diamantopulo K. K., Kuchar V. V., Ermolov D. V.; vlasnyk Pryazovs'kyj derzhavnyj texnichnyj universytet. No u200505677; zajavl. 13.06.2005; opubl. 16.01.2006, Bul. No 1. **3.** Pat. 24638 Ukraina, MPK B21 D 3700. Kompensator poxybok naprjamu povzuna presiv Diamantopulo K. K., Tyhons'kyj O. A., Kravchenko N. E. Evteev A. I.; vlasnyk Pryazovs'kyj derzhavnyj texnichnyj universytet. No u200701523; zajavl. 11.02.2007; opubl. 10.07.2007, Bul. No 10. **4.** Pat. 34270 Ukraina, MPK B21 D 3700. Kompensator poxybok systemy «pres-shtamp» Diamantopulo K. K., Evteev A. I.; Kurylenko O. O.; vlasnyk Pryazovs'kyj derzhavnyj texnichnyj universytet. No u200801325; zajavl. 14.02.2008; opubl. 11.08.2008, Bul. No 15. **5.** Pat. 34286 Ukraina, MPK B30 B 1528, B21 B 2300. Dvocharovyj pruzhnyj element kompensatora poxybok naprjamu Kuchar V. V., Diamantopulo K. K., Lavrentik O. O., Makeev V. P., Balalaeva O. JU.; vlasnyk Pryazovs'kyj derzhavnyj texnichnyj universytet. No u200806970; zajavl. 20.05.2008; opubl. 25.11.2008, Bul. No 22. **6.** Balalaeva E. JU. Raschet universal'nyx uprugix kompensatorov pogreshnostej systemy «pres-shtamp» dlja operazii vytjazhki-formovki. Obrabotka materialov davleniem: sb. nauch. tr. – Kramatorsk: DGMA, 2011. – No 1 (26). P. 193–198. **7.** Pat. 70346 Ukraina, MPK B26 F 140. Sposib tonkolystovogo rozdilovogo shtampuvannja v systemi «pres-shtamp» z bezzazornym naprjamkom ruxomoi chastyny shtampa vidnosno neruxomoi. Mirzak V.J., Bokov V. M.; vlasnyk Kirovograds'kyj nazional'nyj texnichnyj universytet. No u201113040; zajavl. 07.11.2011; opubl. 11.06.2012, Bul. No 11. **8.** Mirzak V.J., V. M. Bokov. Modeljuvannja pokaznykiv micnosti mehanichnogo kompensatora pohybok systemy «pres-shtamp» iz zastosuvannjam metoda skinchenych elementiv. Zbirnyk naukovych prac' Kirovograds'kogo nazional'nogo texnichnogo universytetu: texnika v sil's'kogospodars'komu vyrobnyctvi, galuseve mashynobuduvannja, avtomatyzacija. – Vyp., 27. – Kirovograd: KNTU, 2014. P. 3–12.

Надійшла (received) 28.10.2014

УДК 621.7:519.85

В. М. МИХАЛЕВИЧ, докт. техн. наук, проф., ВНТУ;
Ю. В. ДОБРАНЮК, канд. техн. наук, ст. викл. ВНТУ;
В. А. МАТВІЙЧУК, докт. техн. наук, проф. ВНАУ;
Є. А. ТРАЧ, аспірант, ВНТУ, Вінниця

МОДЕЛІ ПІДСУМОВУВАННЯ РОЗСІЯНИХ ПОШКОДЖЕНЬ В ПРОЦЕСАХ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

В даній роботі проаналізовано ключові аспекти моделей підсумовування пошкоджень та їх формалізація для розв'язання задач тривалої міцності та деформівності. Показано широке використання теорії деформівності в численних закордонних працях та здійснено аналіз використовуваної термінології ключових понять. Відзначено переваги застосування теорії деформівності, що базується на виборі певної моделі підсумовування пошкоджень у порівнянні з моделями руйнування, що вбудовані в сучасні програмні комплекси.

Ключові слова: граничні пластичні деформації, показник напруженого стану, моделі підсумовування пошкоджень, циліндрична заготовка, осадження.

Вступ. При розробці багатьох процесів обробки тиском суттєвим обмежуючим чинником є невисока пластичність матеріалу заготовки, що обробляється. Важливою задачею є виготовлення та експлуатація деталей і механізмів із забезпеченням необхідного запасу пластичності та міцності. Під час виготовлення деталей деформуванням на пластичність впливає велика кількість чинників. До таких чинників належать фізико-механічні властивості матеріалу, термомеханічні параметри технологічних процесів та ін. Під час холодного деформування великий вплив на пластичність матеріалу здійснює значення показника напруженого стану та закономірність його зміни в процесі пластичного формозмінення. Саме тому велика увага науковців зосереджена на дослідженні закономірностей накопичення пошкоджень. Впродовж багатьох десятиліть набуває розвитку феноменологічний підхід в теорії розсіяних пошкоджень. Моделі розсіяних пошкоджень використовуються науковцями для кількісної оцінки впливу напруженого стану та закономірностей його зміни під час деформування на граничну пластичну деформацію до руйнування, яка ідентифікується появою тріщини, що призводить до бракування деталей.

Аналіз останніх досліджень та літератури. На сьогоднішній день науковими школами було розроблено велику кількість моделей накопичення пошкоджень, за допомогою яких намагаються описати ключеві особливості та закономірності тих чи інших процесів деформування [1−7]. Але ще в значній частині вітчизняних та закордонних наукових праць застосовуються спрощені або занадто громіздкі моделі без чіткого розуміння правомірності або доцільності їх використання для опису певного процесу пластичного

© В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, В. А. Матвійчук, Є. А. Трач, 2014

деформування. Особливої актуальності вибір моделі набуває під час імітаційного моделювання процесів не пружного деформування. Моделі руйнування матеріалу, що входять в базу даних відомих програмних комплексів імітаційного моделювання, виявляються абсолютно безкорисними навіть у відносно простих випадках.

Ціль дослідження, постановка проблеми. Тому однією із основних задач є аналіз наукових підходів та моделей накопичення пошкоджень як вітчизняних, так і закордонних науковців.

Для побудови незалежних моделей пошкоджень використовують діаграми пластичності [1−7], які описують залежність накопиченої граничної деформації від показника напруженого стану k, який можна представити у вигляді відношення гідростатичного тиску до інтенсивності напружень [7]:

$$k = \frac{\sigma_0}{\sigma_i}, \tag{1}$$

або у вигляді співвідношення [1−6]:

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3 \cdot I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_{\text{и}}} = \frac{1}{3} \cdot k, \tag{2}$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження; $\sigma_{\text{и}}$ – інтенсивність напружень:

$$\sigma_{\text{и}} = \sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \tag{3}$$

Як зазначається в роботі [7], діаграма пластичності в зарубіжній літературі називається кривою деформаційного руйнування, а показник напруженого стану, який обчислюється за формулою (1) − triaxiality ratio [7−16].

В програмних комплексах скінченно-елементного моделювання досить часто використовуються апроксимація діаграми пластичності у вигляді співвідношення [7, 9]:

$$\varepsilon_{*_c} = 2{,}48 \cdot e^{-\frac{3}{2} \cdot k}. \tag{4}$$

Подібних апроксимацій розроблено досить багато [2−4, 17], але головною задачею теорії деформівності залишається не розробка апроксимацій діаграми пластичності при стаціонарному деформуванні, а їх використання для оцінки граничних деформацій при нестаціонарних процесах деформування [2, 5].

В роботі [5] замість терміну «діаграма пластичності» вживається «крива граничних деформацій при стаціонарному деформуванні», що по суті відповідає термінології зарубіжних науковців та уточнює саме поняття. Для оцінки граничного стану заготовок при певному процесі обробки металів

тиском застосовують моделі накопичення розсіяних пошкоджень [1−6]. Класифікація та значний розвиток яких приведений в роботах [2−4].

Однією із найпростіших та найбільш поширених моделей накопичення пошкоджень є лінійна модель В. Л. Колмогорова [1−6]:

$$\psi\left(\varepsilon_u\right)=\int_0^{\varepsilon_u}\frac{d\varepsilon_u}{\varepsilon_{*c}\left[\eta(\varepsilon_u)\right]},\quad \psi\left(0\right)=0,\quad \psi\left(\varepsilon_*\right)=1, \tag{5}$$

де $\varepsilon_{*c}=\varepsilon_{*c}(\eta)$ – крива граничних деформацій під час стаціонарного деформування [1−6]; $\eta=\eta(\varepsilon_u)$ – траєкторії деформацій; ε_* – гранична деформація, що відповідає певній траєкторії деформацій.

Аналогом якої в теорії тривалої міцності є інтеграл Бейлі:

$$\psi\left(t\right)=\int_0^t\frac{d\tau}{t_{*c}\left[\sigma_i\left(\tau\right)\right]},\qquad \psi\left(0\right)=0,\quad \psi\left(t_*\right)=1, \tag{6}$$

де ψ − величина пошкодженості, яка характеризує ступінь зміни властивостей матеріалу; t_* − розрахунковий час до руйнування при заданому законі зміни інтенсивності напружень $\sigma_i=\sigma_i(t)$ під час експерименту; $t_{*c}=t_{*c}(\sigma_i)$ – крива тривалої міцності.

Використовуючи експериментально-аналітичну методику оцінки напружено-деформованого стану бічної поверхні циліндричних заготовок при вісесиметричному осадженні та модель накопичення пошкоджень (5), в роботі [5] розроблено методику побудови моделі граничних деформацій бічної поверхні циліндричних заготовок при торцевому стисненні, отримано модель та побудовано криву граничних деформацій при нестаціонарному деформуванні (рис. 1):

$$\begin{cases}\eta=\omega\left(\tau_*\left(m\right)\right)\\ \varepsilon_*\left(\tau_*\left(m\right),m\right)=m\cdot\int_0^{\tau_*(m)}\dfrac{1}{f\left(2,\tau\right)\cdot\cos^2\left(\tau\right)}d\tau.\end{cases}$$

$$\frac{m}{a_2}\cdot\int_0^{\tau_*(m)}\frac{\exp\left[\omega\left(\tau\right)\cdot\ln\left(a_1\cdot\dfrac{1-\omega\left(\tau\right)}{2\cdot a_2}+a_2\cdot\dfrac{1+\omega\left(\tau\right)}{2\cdot a_3}\right)\right]}{f\left(2,\tau\right)\cdot\cos^2\left(\tau\right)}\cdot d\tau-1=0, \tag{7}$$

де

$$\omega\left(\tau\right)=f\left(1,\tau\right)\cdot f\left(2,\tau\right),$$

$$f\left(k,\tau\right)=\left(1+\left(-1\right)^k\cdot 3\cos^{2k}\left(\tau\right)\right)^{\frac{(-1)^{k+1}}{k}},\quad k=1,2, \tag{8}$$

яка описує граничний стан бічної поверхні циліндричних заготовок при вісесиметричному осадженні.

Із приведених на рис. 1 результатів видно наскільки різняться оціночні значення граничних деформацій при стаціонарному та нестаціонарному деформуванні. Це свідчить про недопустимість нехтування врахування зміни напружено-деформованого стану бічної поверхні циліндричних заготовок при вісесиметричному осадженні за умов інтенсивного бочкоутворення.

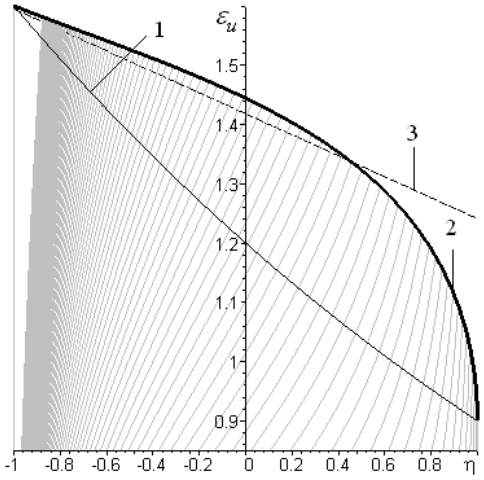


Рис. 1 – Криві граничних деформацій при вісесиметричному осадженні циліндричних заготовок [5]: 1 – стаціонарне деформування; 2, 3 – нестаціонарне деформування; 2 – чисельний розв'язок; 3 – аналітичний розв'язок, $e_* \approx 1{,}418 - 0{,}177\eta$; сірі лінії – траєкторії деформування для різних значень параметра бочкоутворення m

Із використанням найпростішої моделі накопичення пошкоджень можна отримати досить складну нелінійну модель граничних деформацій, головне наповнити її відповідними аналітичними залежностями опису певного процесу деформування. Трапляються випадки, коли, застосування певних моделей накопичення пошкоджень відбувається без достатньо глибокого усвідомлення фізичного змісту і особливостей процесу деформування, в результаті науковці отримують не коректні результати, які помилково вважають достовірними.

Вказана ситуація досить часто відбувається під час імітаційного моделювання процесу деформування. Адже приведені в програмних комплексах моделі накопичення пошкоджень дають здебільшого оцінюючий результат, застосовний для вузького кола задач. Проте умови коректного застосування подібних моделей в документації програмних комплексів відсутні. Розв'язання проблеми поєднання переваг традиційних та нових підходів дослідження процесів деформування запропоновано в праці [5] у вигляді комбінованої методики експериментально-аналітичного та імітаційного моделювання. Одна із головних особливостей вказаної методики полягає в

тому, що до отриманих в програмному комплексі результатів імітаційного моделювання застосовується модель граничного стану на основі певної моделі підсумовування пошкоджень.

Висновки. Розроблені в роботі [5] методики аналітичного опису граничного стану надають можливість отримати коректний умовам експериментального дослідження результат та розробити аналогічні моделі із використанням інших моделей підсумовування пошкоджень, кривих граничних деформацій при стаціонарному деформуванні, і аналітичного опису НДС заготовки.

Список літератури: **1.** *Смирнов-Аляев Г. А.* Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные методы расчета операций пластической обработки материалов / *Г. А. Смирнов-Аляев* – М. – Л. : Машгиз, 1961. – 463 с. **2.** *Огородников В. А.* Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / *В. А. Огородников* – К.: УМК ВО, 1989. – 152 с. **3.** *Матвийчук В .А.* Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: монография / *В. А. Матвийчук, И. С. Алиев.* – Краматорск : ДГМА, 2009. – 268 с. **4.** *Михалевич В. М.* Тензорні моделі накопичення пошкоджень / *В. М. Михалевич*. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1998. – 195 с. – ISBN 966-7199-20-7. **5.** *Михалевич В. М.* Моделювання напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні: монографія / *В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк.* – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 180 с. **6.** *Тарновский И. Я.* Теория обработки металлов давлением / *И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго, В. Л. Колмогоров, В. Н. Трубин и др.* – М. : Металлургиздат, 1963. – 665 с. **7.** *Боровик П. В.* Новые подходы к математическому моделированию технологических процессов обработки давлением : Монография / *П. В. Боровик, Д. А. Усатюк.* – Алчевск : ДонДТУ, 2011. – 299 с. **8.** *Chiantoni G.* Experimental study of the effect of triaxiality ratio on the formability limit diagram and ductile damage evolution in steel and high purity copper / *G. Chiantoni, N. Bonora, A. Rugglero* // Int J Mater Form – 2010, vol. 3, Suppl 1: 171–174. **9.** *Gernot Trattniga* Fracture of austenitic steel subject to a wide range of stress triaxiality ratios and crack deformation modes / *Gernot Trattniga, Thomas Antretterb, Reinhard Pippana* // Engineering Fracture Mechanics, − 2008, Vol. 75, Issue 2, P. 223–235. **10.** *Marusich T.* Modelling and simulation of highspeed machining. / *T. Marusich, M. Ortiz.* // Int. J. NuMoscow Meth. Eng. −1995. − №38. −P. 3675–3694. **11.** *Rice J. R.* On the ductile enlargement of voids in triaxial stress field P. / *J. R. Rice, D. Tracey.* // J. Mech. Phy P. Solid P. – 1969. − №17. – P. 201–217. **12.** *Mediavilla J.* A nonlocal triaxiality-dependent ductile damage model for finite strain plasticity / *J. Mediavilla, R.H.J. Peerlings, M.G.D. Geers* // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. – 2006. − №195. – P. 4617–4634. **13.** *Bhadauria Shailendra Singh* Effect of stress triaxiality on yielding of anisotropic materials under plane stress condition / *Shailendra Singh Bhadauria, M. P. Hora, K. K. Pathak* // Journal of Solid Mechanic P. – 2009. − Vol. 1, − No. 3. − P. 226-232. **14.** *Barsoum Imad* The effect of stress state in ductile failure : doctoral thesis no. 69. / *Imad Barsoum* // KTH Solid Mechanic P. Royal Institute of Technology. SE-100 44 Stockholm, Sweden. – 2008. − P. 30. **15.** *Vadillo G.* An analysis of Gurson model with parameters dependent on triaxiality based on unitary cells / *G. Vadillo, J. Fernandez-Saez* // European Journal of Mechanic P. − A/Solid P. – 2009. – Vol. 28, − Issue 3. − P. 417–427. **16.** *Darlet Adrien* Stress triaxiality on free edges in elastoplastic structures [Electronic resource] / *Adrien Darlet, Rodrigue Desmorat* // LMT-Cachan, ENS Cachan/UPMC/CNRS/PRES UniverSud Paris – p. 3. − Access mode.: http://w3.lmt.ens-cachan.fr/PDFs/DARLET.2013.1.pdf. **17.** Михалевич В. М. Аппроксимация кривых предельной деформации сплайн-функциями / В. М. Михалевич, Л. И. Алиева // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА. − 2010. – №3(24). − С. 3−10.

Bibliography (transliterated): **1.** *Smirnov-Aljaev G. A.* Soprotivlenie materialov plasticheskomu deformirovaniju. Inzhenernye metody rascheta operacij plasticheskoj obrabotki materialov *G. A. Smirnov-Aljaev* – MOSCOW – L. : Mashgiz, 1961. – 463 P. **2.** *Ogorodnikov V. A.* Deformiruemost' i razrushenie metallov pri plasticheskom formoizmenenii *V. A. Ogorodnikov* – K.: UMK VO, 1989. – 152 P. **3.** *Matvijchuk V. A.* Sovershenstvovanie processov lokal'noj rotacionnoj obrabotki davleniem na osnove analiza deformiruemos ti metallov: monografija *V. A. Matvijchuk, I. P. Aliev.* – Kramatorsk: DGMA, 2009. – 268 P. **4.** *Mykhalevych V. M.* Tenzorni modeli nakopychennya poshkodzhen' *V. M. Mykhalevych.* – Vinnytsya :

UNIVERSUM–Vinnytsya, 1998. – 195 P. **5.** *Mykhalevych V. M.* Modelyuvannya napruzheno-deformovanoho ta hranychnoho staniv poverkhni tsylindrychnykh zrazkiv pry tortsevomu stysnenni: monohrafiya *V. M. Mykhalevych, Yu. V. Dobranyuk*. – Vinnytsya: VNTU, 2013. – 180 P. ISBN 978-966-641-532-8. **6.** *Tarnovskij I. Ja.* Teorija obrabotki metallov davleniem *I. Ja. Tarnovskij, A. A. Pozdeev, O. A. Ganago, V. L. Kolmogorov, V. N. Trubin i dr*. – Moscow: Metallurgizdat, 1963. – 665 P.. **7.** *Borovik P. V.* Novye podhody k matematicheskomu modelirovaniju tehnologicheskih processov obrabotki davleniem : Monografija *P. V. Borovik, D. A. Usatjuk*. – Alchevsk : DonDTU, 2011. – 299 P. **8.** *Chiantoni G.* Experimental study of the effect of triaxiality ratio on the formability limit diagram and ductile damage evolution in steel and high purity copper *G. Chiantoni, N. Bonora, A. Rugglero* Int J Mater Form – 2010, vol. 3, Suppl 1: 171–174. **9.** *Gernot Trattniga* Fracture of austenitic steel subject to a wide range of stress triaxiality ratios and crack deformation modes *Gernot Trattniga, Thomas Antretterb, Reinhard Pippana* Engineering Fracture Mechanics, − 2008, Vol. 75, Issue 2, P. 223–235. **10.** *Marusich T.* Modelling and simulation of highspeed machining. *T. Marusich, M. Ortiz.* Int. J. NuM. Meth. Eng. −1995. − No38. −P. 3675–3694. **11.** *Rice J. R.* On the ductile enlargement of voids in triaxial stress field P. *J. R. Rice, D. Tracey.* J. Mech. Phy P. Solid P. – 1969. − No17. – P. 201–217. **12.** *Mediavilla J.* A nonlocal triaxiality-dependent ductile damage model for finite strain plasticity *J. Mediavilla, R.H.J. Peerlings, M.G.D. Geers* Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. – 2006. − No195. – P. 4617–4634. **13.** *Bhadauria Shailendra Singh* Effect of stress triaxiality on yielding of anisotropic materials under plane stress condition *Shailendra Singh Bhadauria, M. P. Hora, K. K. Pathak* Journal of Solid Mechanic P. – 2009. − Vol. 1, − No. 3. − P. 226-232. **14.** *Barsoum Imad* The effect of stress state in ductile failure : doctoral thesis no. 69. *Imad Barsoum* KTH Solid Mechanic P. Royal Institute of Technology. SE-100 44 Stockholm, Sweden. – 2008. − p. 30. **15.** *Vadillo G.* An analysis of Gurson model with parameters dependent on triaxiality based on unitary cells *G. Vadillo, J. Fernandez-Saez* European Journal of Mechanic P. − ASolid P. – 2009. – Vol. 28, − Issue 3. − P. 417–427. **16.** *Darlet Adrien* Stress triaxiality on free edges in elastoplastic structures [Electronic resource] *Adrien Darlet, Rodrigue Desmorat* LMT-Cachan, ENS CachanUPMCCNRSPRES UniverSud Paris – p. 3. − Access mode.: http:w3.lmt.ens-cachan.frPDFsDARLET.2013.1.pdf. **17.** Mihalevich V. M. Approksimacija krivyh predel'noj deformacii splajn-funkcijami V. M. Mihalevich, L. I. Alieva Obrabotka metallov davleniem: sbornik nauchnyh trudov. – Kramatorsk : DGMA. − 2010. – No3(24). − P. 3−10.

Надійшла (received) 28.10.2014

УДК 656.132

М. М. МОРОЗ, докт. техн. наук, доц., КрНУ, Кременчук

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ М. КРЕМЕНЧУК

Приведено методи та результати соціалогічно-транспортного опитування населення м. Кременчук. Отримані дані дозволяють прогнозувати транспортну рухомість населення для формування відповідних організаційно-економічних рішень та забезпечення на цій основі високої ефективності і якості пасажирських перевезень. Результати обстеження пасажиропотоків та соціологічного транспортного опитування населення міста дозволяють запровадити заходи щодо підвищення ефективності роботи пасажирського транспорту загального користування.

Ключові слова: соціологічні дослідження, пасажирський транспорт, транспортне обслуговування.

Вступ. Відомо, що соціологічні дослідження (у порівнянні з плановим переписом населення) є ефективним засобом залучення населення до проблем міста і використання результатів соціологічного аналізу на пасажирському транспорті свідчить про актуальність цих робіт.

© М. М. Мороз, 2014

Метою опитування населення стало вивчення аспектів щодо ринку та пропозицій послуг, які надаються транспортом загального користування у звичайному режимі та режимі маршрутного таксомотору. Обстеження проводилось серед трьох груп учасників опитування: в сім'ях, з безпосередніми користувачами транспорту загального користування і власниками транспортних засобів.

Матеріали та результати досліджень. Соціальна оцінка або соціологічне транспортне опитування населення (СТОН) – це системне вивчення соціальних процесів і факторів на пасажирському транспорті, які негативно впливають на результати суспільного розвитку.

СТОН використовується для того, щоб: визначити ключових учасників транспортного процесу та організувати їх участь у виборі проекту щодо удосконалення пасажирських перевезень; забезпечити доцільність запропонованих змін для всіх зацікавлених осіб; оцінити соціальний вплив інвестиційних проектів на міському пасажирському транспорті і, у разі виявлення потенційних негативних фактів, вирішити, яким чином це можна подолати, попередньо провести оцінку рівня транспортного обслуговування населення міста. Далі подані особливості, методика та результати соціологічно-транспортного опитування населення м. Кременчук.

Опитування в м. Кременчук було проведене із залученням фахівців-соціологів та спеціалістів-програмістів для аналізу одержаної інформації (1200 опитувань) за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення. Під час соціальних досліджень були проведені наступні заходи: опитування проведено в 120 сім'ях методом випадкової вибірки в мікрорайонах згідно пропорційності кількості жителів. Інтерв'ю включало наступні запитання: розмір сім'ї; кількість працюючих; доходи; кількість учнів; доступність і використання транспорту; вартість проїзду на транспорті загального користування та приватному; задоволеність роботою транспорту загального користування; сімейні витрати щодо придбання продуктів харчування тощо.

Опитування користувачів транспорту проводилось на зупинках в різні періоди дня. Учасники опитування підходили до людей, які очікували транспорт на зупинках і задавали їм питання щодо: відносно часу чекання, тривалості поїздки, типу ТЗ, що використовується, вартості поїздки і її мети, задоволеність роботою транспорту, про доход сім'ї і готовність платити більшу плату за обслуговування.

Три групи, в кожній з яких було по три інтерв'юера проводили опитування на зупинках в різних частинах міста, кожна група пересувалась по території, що дорівнювало приблизно третині міста. Групи отримали інструкції, самі обирати головні і другорядні зупинки і проводити інтерв'ю в різний час. В

цілому було проведено опитування 520 чоловік з вибіркою користувачів в районах міста.

Увага керівників груп концентрувалась на частоті руху транспорту і його перевантаженості. Вони підраховували пасажирів, які очікують транспорт, 3 рази з інтервалом в 5 хвилин. Крім того, фіксувалась загальна кількість громадян на зупинках та кількість чоловік і жінок. Було досліджено в цілому 27 зупинок і проведено 273 оцінки. Додатково, керівники груп також підраховували кількість ТЗ, які під'їжджали до зупинки або слідували мінуючи її із-за перевантаження. В результаті було проведено 118 таких оглядів.

Головним висновком за результатами опитувань є те, що громадяни у більшості випадків невдоволені роботою транспорту загального користування, а тому, незалежно від формулювання питань більше 65% респондентів висловили цю невдоволеність.

Причиною такої ситуації є: недостатня кількість транспортних засобів на маршруті, їх незадовільне утримання і експлуатація, а також відсутність необхідної інфраструктури доріг. Однак, особлива невдоволеність обслуговування маршрутними таксомоторами була висловлена населенням щодо існуючих високих цін на проїзд в порівнянні з низькою якістю запропонованих послуг.

Таким чином, результати розробки повинні бути сфокусовані на питаннях покращання надання послуг транспортного обслуговування населення міста для того, щоб їх якість відповідала ціні поїздки. Наступне питання, яке заслуговує на увагу, є створення маршрутної системи, яка б оптимально задовольняла попит населення на перевезення. Це спонукало до проведення комплексного обстеження пасажиропотоків на міських маршрутах.

Алгоритм проведення СТОН:

а) показники опитування сімей та користувачів транспорту:

В середньому сім'я, яка була опитана складається – 2,5 чоловіки, один з них працюючий. Біля 65% сімей – українці; 25,0 – росіяни та інші етнічні групи. Більшість сімей проживають в своїх квартирах – 75,9%, а 14,1% – володіють або орендують окремі житлові приміщення. Сімейне опитування було сфокусоване на населення, яке працює, а тому воно було виділене в окреме спостереження. Громадяни, які слідують на роботу та з іншими цілями пішки або на власному автомобілі не були охоплені опитуванням.

б) мета поїздки і спосіб пересування:

Опитування користувачів ГТ показали, що жителі м. Кременчук користуються транспортом, головним чином для того, щоб доїхати до роботи (54% опитаних користувачів), для відвідування друзів (15%), для поїздок за

покупками (8%), на навчання і відпочинок (13%) і для повернення додому після цього (40%).

Населення яке працює в значній мірі залежить від ефективності роботи громадського транспорту. В цілому 60,3% працюючих використовують тролейбус або маршрутні таксомотори. Маршрутні таксомотори, очевидно, використовуються не частіше ніж тролейбус. Одночасно біля 65% працюючих при поїздці використовують тролейбус хоча б частково. Понад 60% користується маршрутними таксомоторами, щоб доїхати до роботи і лише 38% з них віддають перевагу виключно маршрутним таксомоторам.

Аналіз поїздок громадян за покупками свідчить про високу залежність від громадського транспорту: 75,1% покупців користується тролейбусом або маршрутним таксомотором, в той час, як 48,1% – тільки тролейбусом. Одночасно, покупці у більшості випадків ніж працюючі ідуть пішки (це пов’язано з тим, що внаслідок переповнення салонів важко розташувати в них свої клунки). 30% респондентів опитуваних сімей ходять за покупками пішки, не користуючись громадським або приватним транспортом в співставленні з аналогічним показником, що дорівнює 20% серед тих, що використовують ГТ для поїздок на працю.

Таким чином, аналіз даних опитувань сімей показав широке використання жителями громадського транспорту для різних цілей. Він також проілюстрував важливу роль, яку відіграють маршрутні таксомотори в порівнянні з тролейбусами. Ці висновки підтверджуються результатами опитування користувачів, в якому пасажирів на зупинках запитували про вид транспорту, який вони очікують. Аналіз показав, що понад 30% жителів звичайно чекають мікроавтобуси і віддають перевагу маршрутним таксомоторним перевезенням.

В цілому три фактори впливають на рішення добиратись до роботи пішки: відносно близьке розташування місця праці, недостатність коштів для регулярного користування громадським чи приватним транспортом і значний інтервал руху громадського транспорту. Можна передбачити, що деякі пішоходи, особливо ті, які не користуються громадським транспортом через фінансові труднощі або не дуже надійної його роботи приєднаються до групи користувачів, як тільки робота транспорту буде більш регулярна, а ціни більш доступними для їхнього гаманця. Понад 80% пішоходів вказали на те, що робота міського транспорту потребує вдосконалення.

Встановлено, що вибір виду транспорту залежить від прибутків жителів. Користувачі виключно тролейбусами (19% працюючих) мають значно нижчий прибуток ніж інші працюючі. Цікаво, що жителі, які чекають маршрутний таксомотор мають самий високий покажчик прибутків. Вони можуть сісти в

тролейбус, якщо він прийде першим, але можуть дозволити собі і більш дорогий маршрутний таксомотор.

в) опис всієї поїздки по маршрутах:

Більшість жителів під час поїздок на роботу, ринок тощо добираються до транспортної зупинки пішки. В середньому на це пересування пасажир витрачає 9,2 хв., 51% користувачів витрачають на це 10 або менше хвилин і тільки 11% витрачають більше 20 хв.

Керівниками груп був проведений аналіз частоти руху транспортних засобів: за 15–ти хвилинними інтервалами реєструвалась кількість і тип транспортних засобів в години ранкового піку (6.30–9.30), та години вечірнього піку (16.30–19.00), а також в години спаду пасажиропотоків та вихідний день. Аналіз показав, що в ранкові години пік кількість автобусів і тролейбусів в троє більша ніж у вечірні години пік. Середня частота руху маршрутних таксомоторів в години пік в 3–4 рази більша ніж в години спаду пасажиропотоків.

Встановлено, що середня тривалість очікування в години спаду пасажиропотоків менша ніж у вечірні години пік (11 проти 14 хв.). Таким чином, частота руху транспорту загального користування задовільна в ранкові години пік і поступово погіршується до кінця дня, а після вечірніх годин пік значно погіршується, що не задовольняє попит на перевезення.

Співставлення за статтю свідчить, що жінки чекають транспорт дещо більше ніж чоловіки (15 хв. проти 12 хв.). Це пояснюється тим, що жінки здійснюють поїздок більше, ніж чоловіки у справах не пов’язаних з роботою в період спаду пасажиропотоку, коли частота руху транспорту зменшується.

г) співставлення трудових переміщень по районах:

В м. Кременчук кілька мікрорайонів. Жителі працюють головним чином в центральних районах міста, а живуть в житлових віддалених районах. Для більш глибокого розуміння схем пересування населення були вивченні пасажиропотоки працюючих з різних районів. Було виявлено, що до 24% всіх працюючих працюють в своєму районі. З них понад 70% пішоходи, і 30% – користуються транспортом.

Істотна більшість працюючих (76%) направляється в інші райони. Найбільше навантаження припадає на центр міста, а саме вул. 60р. Жовтня, Київська, де велика концентрація закладів культурного та адміністративного призначення, побутового та іншого призначення і пасажиропотоки досягають 45% перевантаження. Іншими пасажиронапруженими районами є так званий мікрорайон Молодіжний, Порт – 23,3%; житлові масиви I, II та III Занасип, Раківка (в основному приватний сектор) – 14%; залізничний вокзал та

автовокзал – 20,3%. Потрібно звернути увагу на те, що істотна частина населення використовує транспорт загального користування на 2–4 зупинки, і таким чином, суттєво перевантажує транспортні засоби. Це особливо стосується центральної частини міста, по який здійснюють перевезення автобусний та електротранспорт.

д) пріоритетність використання маршрутних таксомоторів:

Дослідження показали, що маршрутними таксомоторами 6,4% респондентів користуються на відстань до 5 км; 21,3% – на відстань до 7 км; 42,5% – на відстань до 10 км; 29,8% – понад 10 км.

На запитання про оцінку кількості населення територіальної громади, яким надаються пільги на проїзд в міському транспорті були отримані відповіді, які засвідчили, що в середньому по місту 29,6% пасажирів отримують відповідні пільги. Вихідні дані та отримані результати проведеного соціологічного транспортного опитування населення міста Кременчук для більшої наочності викладені відповідно в табл. 1–3 та на рис. 1.

Результати аналізу інформації про пріоритетність використання автобусів в режимі маршрутних таксомоторів на міських маршрутах загального користування подано на рис. 2, 3.

Таблиця 1. Дані щодо опитування сімей (середні)

Розмір сім'ї	2,5 чол.
Кількість працюючих в сім'ї	1,5 чол.
Кількість працюючих чоловіків	0,8 чол.
Кількість дітей	0,8 чол.
Кількість школярів	0,8 чол.
Кількість пенсіонерів	0,4 чол.
% сімей, які проживають в квартирах	85,9%
% сімей, які проживають в окремих будинках	14,1%
% доходу сім'ї, який витрачається на продукти	69,3%
% доходу сім'ї, які володіють автомобілем	34,1%

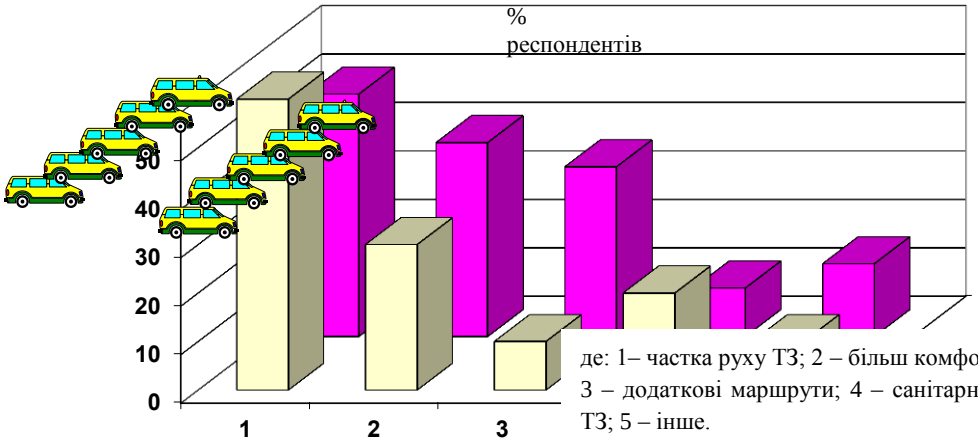
Таблиця 2 – Спосіб пересування населення (побутові цілі)

Спосіб пересування	**%**
Тільки пішки	34,5
Автобус або тролейбус	65,2
Тільки маршрутне таксі	34,8

Таблиця 3 – Пріоритетність використання транспорту загального користування

Вид транспорту	**%**
Тролейбус	48,3
Маршрутний таксомотор	19,8
Таксі (легковий)	0,3
Попутній транспорт	-

Діаграма запропонованих населенням покращень транспортного обслуговування



Сім'ї користувачі

де: 1– частка руху ТЗ; 2 – більш комфортабельні ТЗ; 3 – додаткові маршрути; 4 – санітарно-гігієнічний стан ТЗ; 5 – інше.

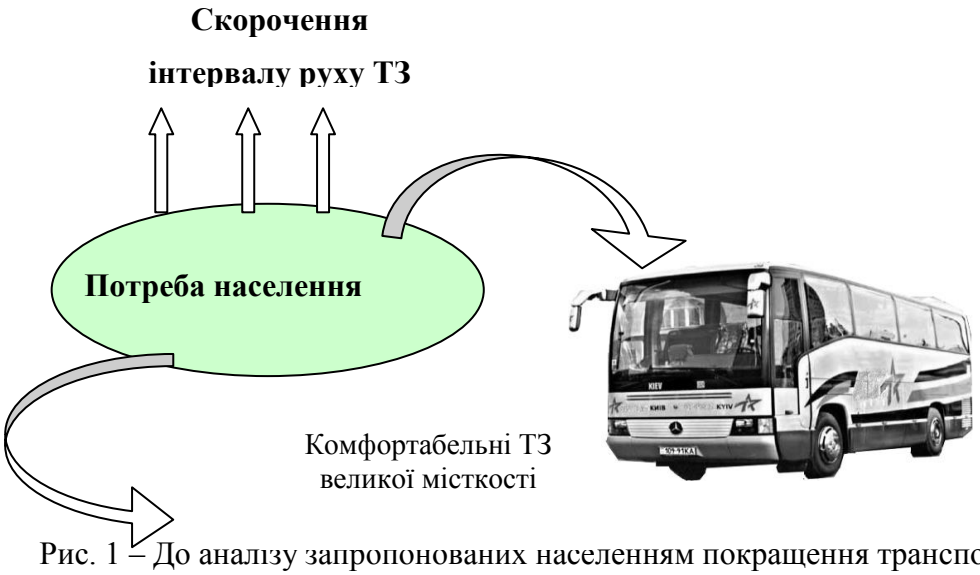


Рис. 1 – До аналізу запропонованих населенням покращення транспортного обслуговування

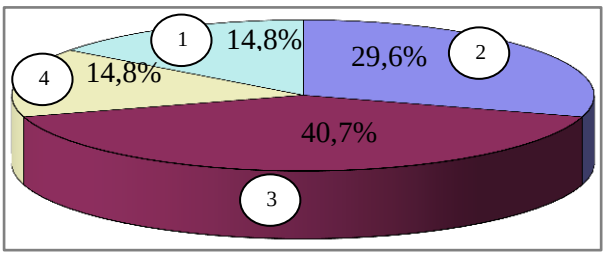


Рис. 2– Діаграма розподілу таксомоторних маршрутів в залежності від відстані, на які здійснюють поїздки респонденти: 1 – відстань до 8 км; 2 – відстань до 10 км; 3 – відстань до 15 км; 4 – відстань понад 15 км

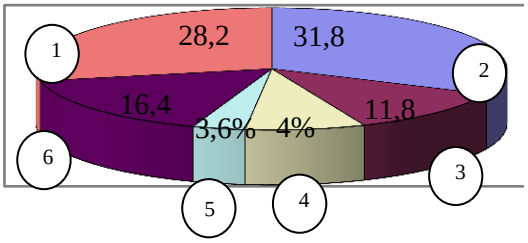


Рис. 3 – Діаграма розподілу таксомоторних маршрутів, які забезпечують зв'язок з: 1 – густонаселеними районами; 2 – вокзалами; 3 – медичними закладами; 4 – примістом; 5 – учбовими закладами; 6 – виробництвом

Висновки. Вихідними даними для розробки заходів з підвищення ефективності роботи окремих маршрутів є результати обстеження пасажиропотоків та соціологічного транспортного опитування населення міста.

За даними проведеного обстеження та відповідної обробки матеріалів з вивчення попиту населення на тролейбусних маршрутах міста Кременчук спостерігається тенденція збереження пасажиропотоків, що дозволяє на найближчу перспективу (тривалість 7–10 років) зберегти існуючу мережу без коригувальних змін траси слідування та функціонування тролейбусних маршрутів.

Поступила (received) 31.10.2014

УДК 621.771

Ю. Д. МУЗЫКИН, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
В. В. ТАТЬКОВ, канд. техн. наук, вед. научн. сотр., НТУ «ХПИ»;
А. Ю. ПУТНОКИ, эксперт-консультант экспертного центра, НТУ «ХПИ»;
П. П. МОСКАЛЕНКО, зам. гл. механика по прокатному производству, ОАО «Запорожсталь», Запорожье

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ СИЛОВЫХ ПРИВОДОВ КЛЕТЕЙ ЛИСТОВЫХ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Рассмотрены вопросы диагностирования технического уровня силовых приводов. предложено оценивать суммарный износ во всех кинематических парах, участвующих в передаче крутящего момента от электродвигателя к рабочим валкам клети, фиксируя люфт при реверсе механического привода без нагрузки. Предложен способ мониторинга изменения суммарного зазора за счет использования лазерного прибора «Leica DISTO» A6. Способ позволяет устанавливать остаточный ресурс работы механической системы/

Ключевые слова: диагностика, силовой привод, кинематические пары, зазор, мониторинг, лазерный прибор.

Введение. В зависимости от конструктивных особенностей листовых станов горячей прокатки силовой привод на участке между электродвигателем и рабочими валками включает полностью либо частично набор основных кинематических элементов, таких как редуктор, зубчатая муфта, шестеренная клеть, промежуточные валы и универсальные шпиндели, устройства для уравновешивания шпинделей, опорные и рабочие валки клети. Даже одно перечисление устройств, принимающих участие в передаче крутящего момента, показывает, насколько сложной является структура кинематической цепи

© Ю. Д. Музыкин, В. В. Татьков, А. Ю. Путноки, П. П. Москаленко, 2014

силового привода и насколько велико число кинематических пар, обеспечивающих связь между отдельными подвижными звеньями.

При условии, что все связи независимые, согласно структурной формуле П.Л. Чебышева, можно установить степень подвижности всего механического привода. Однако, так как для сложных систем условие независимости связей не является строгим, а фактическое качество изготовления и монтажа отдельных элементов лежит в пределах допуска, в процессе работы системы в отдельных ее узлах могут появляться как неучтенные зазоры в кинематических парах, так и линейные и угловые деформации в звеньях. В силу этого появляются дополнительные связи, которые делают механическую систему статически неопределимой и следовательно являются источником дополнительного шума, вибраций, повышенных температур в отдельных элементах конструкции, приводят к снижению коэффициента полезного действия [1]. Устранение таких связей является сложной и трудоемкой работой, так как требует как существенного усложнения кинематических пар за счет понижения их класса при одновременном повышении точности изготовления, так и обеспечения непрерывного контроля, за их техническим состоянием.

Цель работы, постановка задачи. Надежность работы каждого из подвижных сопряжений зависит от большого числа эксплуатационных параметров, которые в большинстве случаев не детерминированы и поэтому носят вероятностно-статистический характер, что позволяет производить только качественную оценку технического уровня сопряжения. Для оценки надежности работы всей кинематической цепи в целом, необходимо знать распределение отказов, как случайных событий в виде статистической модели.

Теоретически для рассматриваемого силового привода можно предположить нормальный закон распределения отказов, так как согласно центральной предельной теореме для случайной величины, представляющей собой общий результат большого числа независимых воздействий. Наиболее вероятным является нормальный закон распределения, и он тем вероятнее, чем большее число воздействий и чем меньше влияние каждого из них на конечный результат [2, 3]. Данное предположение было подтверждено экспериментально для главного привода непрерывного тонколистового стана «1680» цеха горячей прокатки тонкого листа металлургического комбината ОАО «Запорожсталь» [4].

Для установления данной зависимости были обработаны результаты наблюдений изменения крутящего момента на валу приводного электродвигателя, который непосредственно соединен с вал-шестерней силового редуктора чистовой клети № 5 через промежуточный вал. Объективность полученного результата, учитывающего все возможные

независимые параметры эксплуатации, была достигнута за счет репрезентативности выборки, которая составила 120 часов непрерывной работы стана, и ее случайности, так как она была взята из генеральной совокупности в 4500 часов. Проведенное сравнение эмпирического и теоретического нормального законов распределения показало высокую степень их согласования и позволяет утверждать, что распределение отказов по всей линии силового привода клети листового стана горячей прокатки подчиняется нормальному закону распределения.

При мониторинге технического состояния силовых приводов клетей в условиях ограниченной информации о рабочих параметрах, определяющих надежность их работы, центральной проблемой диагностики становится нахождение эффективных признаков, дающих количественную оценку технического уровня всей системы в целом. В случае нахождения такого интегрального показателя становится возможным определять не только текущее состояние силового привода, но и прогнозировать остаточный ресурс его работы, а следовательно, планировать различные виды ремонтов, исключающих отказы в работе оборудования и, как следствие, остановки прокатного стана.

Материалы исследования. Диагностирование технического состояния главных приводов клетей листовых станов горячей прокатки можно выполнить различными методами. Методы по своей физической сущности сводятся к двум основным схемам: контроль косвенных параметров, являющихся побочным проявлением нарушений в кинематической цепи передачи крутящего момента, и прямой метод, при котором фиксируются непосредственно параметры состояния рассматриваемой кинематической цепи [5, 6].

В первом случае фиксируются вторичные параметры, обусловленные техническим состоянием исследуемых узлов, например, такие как уровень шума, вибрации отдельных элементов и узлов, температура в зоне сопряжения отдельных звеньев, наличие побочных примесей в системах смазки, а также появление продуктов износа и так далее. Достоинством этих методов является простота их реализации, быстрота проведения контроля исследуемых параметров, возможность, в большинстве случаев, проводить контроль при работающем оборудовании, наличие стандартных приборов контроля, а следовательно, возможность проведения данных работ обслуживающим персоналом без специальной дополнительной подготовки. Однако эти методы имеют существенный недостаток, так как могут быть применены только для качественной оценки технического уровня исследуемого объекта и не обеспечивают получения количественной интегральной характеристики технического состояния всей системы в целом.

Прямой метод измерений предусматривает фиксацию параметра, который непосредственно связан с техническим уровнем контролируемых узлов, а следовательно, определяет их текущее состояние и позволяет прогнозировать остаточный ресурс работы, что необходимо для планирования различных видов ремонтных работ, исключающих отказы в работе оборудования и, как следствие, остановки стана. Для выбора такого критерия оценки необходимо проанализировать как условия работы механической системы, так и возможный объективный параметр данной системы, который наиболее чувствительный к условиям работы, и изменение во времени которого, можно объективно фиксировать.

Анализ условий работы, силовых приводов клетей листовых станов горячей прокатки показывает, что они работают при высоких единичных нагрузках со значительной динамической составляющей в широком температурном диапазоне при переменных высоко– и низкочастотных вибрациях в звеньях и кинематических парах.

Параметр механической системы, который наиболее чувствительный к указанным условиям работы и величина во времени которого адекватно реагирует на их величину и изменение, является зазор в кинематических парах. Как было показано, изменение зазора в кинематических парах не только определяет функциональное состояние силового привода, но и при определенном предельном его значении может привести к отказу в работе всего стана. Контроль износа в каждой отдельно взятой кинематической паре, являясь технически сложной задачей, не несет практически никакой информационной нагрузки, в то время как величина суммарного зазора по всем кинематическим парам является интегральной характеристикой технического состояния всего силового привода в целом и может быть достаточно легко определена на практике.

Измерение суммарного износа во всех кинематических парах, участвующих в передаче крутящего момента, предлагается оценивать по люфту, который фиксируется при реверсе механического привода. Для этого контролируется момент начала вращения вала электродвигателя и момент, когда начинает вращаться рабочий валок клети. Определив, таким образом, угол поворота, обусловленный люфтом в кинематической цепи, устанавливается суммарный зазор во всех подвижных узлах механизма. Один из способов измерения угла поворота, вызванного люфтом в сопряжениях, представлен на рисунке.

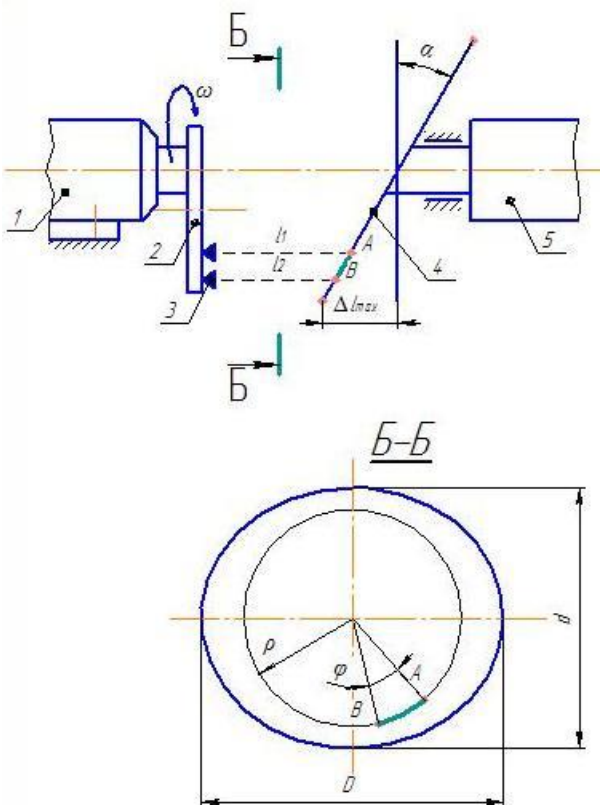


Рис. – Расчетная схема измерения люфта: 1 – электродвигатель; 2 – кронштейн; 3 – лазерный прибор; 4 – отражающая поверхность; 5 – рабочий валок клети

Принцип работы устройства заключается в следующем. На валу электродвигателя 1 установлен кронштейн 2, к которому крепится лазерный прибор 3 «Leica DISTO» A6, измеряющий расстояние до отражающей поверхности 4, укрепленной под углом α к оси рабочего валка прокатной клети 5. Так как отражающая поверхность имеет угол наклона по отношению к линии луча лазера, разность длин лучей ℓ_1 и ℓ_2 при повороте вала электродвигателя будет изменяться тем больше, чем больше угол поворота φ. При заданных параметрах: радиус расположения лазерного прибора ρ, угол наклона отражающей поверхности α, диаметр отражающей поверхности D, длина луча ℓ_1 и ℓ_2 , которые определяют фактическое расстояние от источника излучения до отражающей поверхности в моменты начала и окончания холостого хода, становится возможным установить угол поворота вала электродвигателя, соответствующий полному люфту в сопряжениях. Исходя из геометрических соотношений, представленных на рисунке, можно установить связь между линейными и угловыми параметрами для определения угла поворота вала электродвигателя:

$$\varphi = K\left|\ell_1 - \ell_2\right|, \quad K = \frac{\pi}{2\rho}\operatorname{ctg}\alpha.$$

Место расположения источника излучения на рычаге регламентируется условием

$$\rho \le \frac{D}{2}\cos\alpha.$$

Определение угла поворота вала электродвигателя при его реверсе без нагрузки, соответствующего суммарному люфту в кинематических парах из-за наличия в них зазоров, производится лазерным прибором «Leica DISTO» A6 автоматически в режиме функции Пифагора. Вычислив, значение коэффициента K и сохранив его, как константу в приборе, производится измерение расстояния по двум точкам и в режиме работы PYTHAGORAS и STORAGE автоматически определяется искомый угол поворота. Наличие в приборе памяти на 20 измерений или результатов вычислений, а также возможности работы в режиме BLUETOOTH с внешним ПК, становится возможным производить любые статистические расчеты непосредственно в момент измерений. Предложенная схема измерений позволяет не только фиксировать текущее техническое состояние силового привода, но и сравнивая его с предыдущим аналогичным испытанием и установив динамику их изменения по результатам, архивированным в памяти прибора, выполнять экстрополяцию для прогнозирования результатов следующим измерений. В зависимости от предельного значения суммарного износа становится возможным устанавливать остаточный ресурс работы и принимать решения, исключающие возможность возникновения аварийных остановок стана.

Возможности диагностирования технического состояния тонколистовых станов горячей прокатки с помощью лазерного прибора «Leica DISTO» A6 производства Швейцарии регламентируются его техническими характеристиками [7]:

1. Дальность измерения	до 200 м
2. Точность измерения до 30 м	$\pm 1{,}5$ мм.
3. Класс лазерного прибора	II
4. Класс радиооборудования	1
5. Тип лазера	$635nM < 1mW$
6. Диапазон радиочастот	2400 МГц $< 1mW$
7. Радиус действия BLUETOOTH	более 10 м
8. Встроенный оптический визир	2-хкратное увеличение.
9. Сохранение измеренных величин	20 значений.
10. Эксплуатация	$-10°\text{C}$ до $+50°\text{C}$.
11. Питание	тип AA, $2 \times 1{,}5\,\text{V}$.

Выводы. Анализ работы силовых приводов клетей листовых станов горячей прокатки, а также мониторинг их отказов показывает, что основной

причиной выхода их из строя являются нарушения в работе кинематических пар, которые обусловлены появлением значительных зазоров в подвижных сопряжениях. Это связано со спецификой условий их работы, главными из которых являются высокие единичные нагрузки со значительной динамической составляющей, широкий температурный диапазон работы, а также значительные высоко– и низкочастотные вибрации в звеньях и кинематических парах.

Поэтому при проведении диагностики технического состояния силовых приводов предложено оценивать суммарный износ во всех кинематических парах, участвующих в передаче крутящего момента от электродвигателя к рабочим валкам клети, фиксируя люфт при реверсе механического привода без нагрузки.

Для реализации данного метода диагностирования разработана измерительная схема на базе лазерного прибора «Leica DISTO» A6. Метод позволяет не только фиксировать техническое состояние силового привода на момент проведения измерений, но и за счет функциональных возможностей предложенной схемы измерений устанавливать остаточный ресурс работы механической системы, а, следовательно, принимать решения, исключающие возможность аварийных остановок стана.

Предложенный метод диагностики, а также измерительная схема являются универсальными и могут найти широкое применение и в других областях промышленности, где силовые механические приводы работают в идентичных условиях.

Список литературы: **1.** *Артоболевский И.И.* Теория механизмов и машин. – М.: Наука. 1988 – 372 с. **2.** *Солонин И.С.* Математическая статистика в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1972. – 215 с. **3.** *Дисеонсон Н., Лион Ф.* Статистика и планирование в технике. – М.: Мир, 1981. – 385 с. **4.** Определение режимов работы силового редуктора чистовой клети тонколистового стана горячей прокатки «1680» /Гапонов В.С., Музыкин Ю.Д., Столбовой А.С., Татьков В.В., Вышнивецкий С.М. //Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2011. – № 47. – с. 13–17. **5.** *Притыкин Д.П.* Надежность, ремонт и монтаж металлургического оборудования. – М.: Металлургия, 1985. – 368 с. **6.** *Полухин П.И., Федосов Н.М., Королев А.А., Матвеев Ю.М.* Прокатное производство. – М.: Металлургия, 1982.– 696 с. 7. «Leica DISTO» A6. Руководство пользователя. – www. disto.ru.

Bibliography (transliterated): 1. Artobolevskiyj I.I. Teoriya mekhanizmov i mashin. – Moscow: Nauka. 1988 – 372 P. **2**. Solonin I. P. Matematicheskaya statistika v tekhnologii mashinostroeniya. – Moscow: Mashinostroenie, 1972. – 215 P. **3**. Diseonson N., Lion F. Statistika i planirovanie v tekhnike. – Moscow: Mir, 1981. – 385 P. **4**. Opredelenie rezhimov rabotih silovogo reduktora chistovoyj kleti tonkolistovogo stana goryacheyj prokatki «1680» /Gaponov V. P., Muzihkin Yu.D., Stolbovoyj A. S., Tatjkov V.V., Vihshniveckiyj P.MOSCOW //Visnik NTU «KhPI». Tematichniyj vipusk: Novi rishennya v suchasnikh tekhnologiyakh. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2011. – No 47. – P. 13–17. **5**. Pritihkin D.P. Nadezhnostj, remont i montazh metallurgicheskogo oborudovaniya. – Moscow: Metallurgiya, 1985. – 368 P. **6**. Polukhin P.I., Fedosov N.MOSCOW, Korolev A.A., Matveev Yu.MOSCOW Prokatnoe proizvodstvo. – Moscow: Metallurgiya, 1982. – 696 P. 7. «Leica DISTO» A6. Rukovodstvo poljzovatelya. – www. disto.ru.

Поступила (received) 26.10.2014

УДК 539.411.001.24

Е. А. НАУМОВА, инженер, КрНУ им. М. Остроградского;
Д. В. МОСЬПАН, канд.техн.наук, доц. КрНУ им. М. Остроградского;
А. В. ВОРОНИН, инженер, КрНУ им. М. Остроградского;
В. В. ДРАГОБЕЦКИЙ, д-р техн. наук, профессор, КрНУ
им. М. Остроградского, Кременчуг

КОРРЕКТИРОВКА РЕЖИМОВ УПРОЧНЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Рассмотрены особенности эксплуатации машин и агрегатов в условиях современного производства. Новым направлением при разработке изделий с высокими эксплуатационными характеристиками является получение наноструктурных композиционных материалов и материалов с преобразованной упорядоченной структурой. Деформационная неустойчивость возникает при деформациях равных предельным равномерным. Предложены методы теоретического определения предельных равномерных деформаций, что позволяет оптимизировать процессы упрочнения пластическим деформирования, калибровки и формоизменения деталей с элементами жесткости.

Ключевые слова: упрочнение, пластическая деформация, устойчивость, структура.

Введение. Развитие ведущих отраслей техники неизменно связано с достижениями в области технологий производства и обработки материалов.

Современные отрасли промышленности характеризуется непрерывным ростом энергонапряженности экстремальными и чрезвычайно интенсивными параметрами нагружения при эксплуатации. Поэтому обеспечить эксплуатационную надежность и долговечность машин, агрегатов и деталей возможно только приданием специальных свойств применяемым материалам. Обеспечение производства материалов с высокими физико-механическими характеристиками диктует необходимость применения новых методов обработки, обеспечивающих высокое качество и производительность изготовления изделий.

Упрочнение методами пластического деформирования широко используется для повышения усталостной прочности, твердости и износостойкости поверхностного слоя металла, а также для формирования в этом слое направленных внутренних напряжений и изменения структурных несовершенств, дробления блоков и создания микронапряжений. Поверхностная пластическая деформаций приводит к образованию сдвигов и упругому искажению кристаллической решетки, изменению формы и размеров решетки. Наибольшее влияние на эксплуатационные характеристики обрабатываемых изделий оказывают режимы упрочнения, физико-механические свойства, структура и химический состав материала.

© Е. А. Наумова, Д. В. Мосьпан, А. В. Воронин, В. В. Драгобецкий, 2014

Оптимальным режимом поверхностного пластического деформирования, проводимого с целью упрочнения, усталостной прочности, износостойкости, является такой, который обеспечивает оптимальное приращение предела прочности $\Delta\sigma_{в}$ при определенных показателях пластичности, максимального приращения предела выносливости $\Delta\sigma_{1}$ [1], максимально снижения интенсивности изнашивания ΔI. Решение проблемы повышения эксплуатационных характеристик надежности и долговечности деталей машин и агрегатов чрезвычайно актуально и сулит значительным снижением затрат на эксплуатацию, ремонт и восстановление оборудования.

Вопросы определения силовых параметров упрочнения методами пластического деформирования нашел принципиальное решение в ряде работ [1–4]. Что касается формирования оптимального физического состояния поверхностного слоя – таких рекомендаций практически нет. В настоящее время установлено, что деформационное упрочнение оптимально при интенсивности деформаций равной предельной равномерной [1]. Однако вопрос их достаточно точного для практики определения не решен в полной мере. Поэтому целью исследований являются разработки теоретико-экспериментального метода определения предельных равномерных деформаций.

Определение оптимальных режимов упрочнения методами пластического деформирования позволяет улучшить технико-экономические показатели процессов пластического деформирования и определить направление поиска новых технологий.

Среди многообразных по физико-химической природе воздействия на материал предпочтение следует отдавать тем, которые совершенствуются в соответствии с объективными законами развития технических систем. Согласно этим законам, развитие технических систем и технологий идет в направлении перехода от механических воздействий к электромагнитным, тепловым, волновым и др., увеличения степени дисперсности вещества, числа связей между элементами и отзывчивости системы; использования в качестве рабочего органа и инструмента молекул, атомов, ионов, электронов. Пути совершенствования и повышения эффективности процессов волнового, теплового, электромагнитного воздействия на обрабатываемый материал или заготовку после систематизации может быть достигнуто различными способами:

– переходов от простых (элементарных) физических воздействий к сложным – цепным и двойным;

– построением двойного физического воздействия путем введения дополнительного физического, в том числе волнового воздействия, которое хорошо поддается управлению;

– заменой неуправляемого (плохо управляемого) физического воздействия управляемым, например заменой механического воздействия электрическим или электромагнитным;

– путем увеличения степени дисперсности или волновых свойств вещества, играющего роль инструмента передающего элемента или среды;

– переходом от сплошных веществ к пористым, капиллярно-пористым, двух и многокомпонентным;

– повышением степени динамичности системы, т.е. переходом к более гибкой, быстро меняющейся структуре системы;

– переходом от однородных волновых воздействий или имеющихся неупорядоченный характер нагружения или структуру к волновым воздействиям неупорядоченным или имеющим определенную пространственно-временную структуру;

– согласованием или рассогласованием волнового воздействия с собственной частотой заготовки или инструмента;

– периодическим воздействием одного импульсно-волнового воздействия в паузах другого;

– взаимодействием внешнего электромагнитного поля с контактно подведенными или неконтактно индуцированными токами;

– использование электрореологических суспензий с управляемой вязкостью.

Принципиально новыми направлениями в разработке изделий с высокими эксплуатационными характеристиками является получение наноструктурных конструкционных материалов и материалов с преобразованной к упорядоченной структурой и если получение наноструктурных конструкционных материалов чрезвычайно трудоемко и энергозатратно, то получение материалов с преобразованной к упорядоченной структурой возможной в рамках технологических параметров традиционных процессов обработки. Такие структуры возникают тогда, когда имеет место достаточно интенсивный поток энергии или вещества в условиях тепловой, силовой, энергетической или деформационной неустойчивостью. В процессах обработки заготовок методами пластического деформирования при формоизменении и упрочнении напряжение течения зависит от температуры степени деформации, скорости деформации, продолжительности деформации, состава и структуры материала. В рамках гипотезы о единой кривой, эту зависимость для

конкретного материала с изменяемой в процессе деформации структурой можно выражать в дифференциальной форме

$$d\omega_i = \frac{\partial \sigma_i}{\partial T} dT + \frac{\partial \sigma_i}{\partial \varepsilon_i} d\varepsilon + \frac{\partial \sigma_i}{\partial \dot{\varepsilon}_i} d\dot{\varepsilon} + \frac{\partial \sigma_i}{\partial t} dt + \frac{\partial q_k}{\partial \varepsilon_i} d\varepsilon + \frac{\partial q_k}{\partial \varepsilon_i} d\varepsilon + \frac{\partial q_k}{\partial t} dt \qquad (1)$$

где σ_i – интенсивность напряжений;

ε_i, $\dot{\varepsilon}_i$ – интенсивность деформаций и скоростей деформаций;

T – температура;

t – время;

q_k – параметры, характеризующие внутреннюю структуру материала, нижний индекс – номер параметра.

Учитывая, что наиболее оптимальная структура материала по эксплуатационным характеристикам образуется при деформациях равным предельным равномерным, то условие, позволяющее определить эти деформации, имеет вид:

$$\frac{1}{\sigma_i}\left(\frac{\partial \sigma_i}{\partial \varepsilon_i} d\varepsilon_i + \frac{\partial \sigma_i}{\partial \dot{\varepsilon}_i} d\dot{\varepsilon}_i \right) = \frac{1}{\delta}\left|\frac{\partial \delta}{\partial \varepsilon}\right| d\varepsilon + \frac{1}{\sigma}\left|\frac{\partial \sigma}{\partial t}\right| dt\,, \qquad (2)$$

где δ – геометрический параметр заготовки (площадь, толщина, смещенный объем).

Для частных случаев формоизменения калибровки и упрочнения вязкопластического материала с коэффициентами деформационного упрочнения n и скоростного упрочнения m, t с учетом того, что структурные составляющие получают экстремальные значения, уравнение упрощается:

а) при постоянной скорости деформации $\dot{\varepsilon}_n = const$

$$\varepsilon_{кр} = \varepsilon_p = n\,;$$

б) при постоянной скорости растяжения или сжатия (процессах упрочнения пластическим деформированием, калибровки) при кратковременности процесса нагружения и др.)

$$\varepsilon_{кр} = \varepsilon_{\text{р}} = \frac{n}{1-m}\,;$$

В других случаях к соотношению необходимо добавить уравнения равновесия и пластичности.

Приближенные, но достаточно точные значения ε_p можно находить по зависимости [1]

$$\varepsilon_{\text{кр}} = \varepsilon_{\text{р}} = \frac{245}{\text{НД}}\,, \qquad (3)$$

где НД – пластическая твердость 6 МПа (ГОСТ 18835-73).

Для процессов импульсной обработки знаменатель выражения (3) следует умножить на коэффициент динамичности.

Определение деформаций, соответствующих предельным равномерным, возможно с использованием соотношения для скорости пластических деформаций в форме Гилмана-Джонстона [3]

$$\varepsilon_i = \frac{4}{3} bC_o \left(n_o + \frac{3}{4} m\varepsilon_i \right) exp\left[-2\left(D + \frac{3}{4} H \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \right) \right] \qquad (4)$$

где n_o – начальная плотность;

b – вектор Бюргерса;

m – коэффициент размножения дислокаций;

H – постоянная упрочнения;

C_o – скорость звука в поперечном направлении;

D – эмпирическая постоянная.

Соотношение (4) имеет экстремум (при фиксированных значениях σ_i). При достижении экстремума или критического значения пластических деформаций, при росте общей плотности дислокаций «запирются» подвижные дислокации и достигается предельно возможное упрочнение и упорядоченная структура.

Значение критических деформаций определяется при $\frac{d\dot{\varepsilon}}{d\varepsilon} = 0$. Критическое значение деформаций соответствует второму условию локализации деформаций (потери устойчивости).

$$\varepsilon_i = \frac{4}{3m}\left(\frac{\sigma_i}{H} - n_o \right) \qquad (5)$$

Выводы. Составление расчетных значений предельных равномерных деформаций по зависимостям (2, 3, 5) показал их незначительное их отличие в пределах 10÷15 %. Следовательно, вполне допустимо в практике использовать зависимость (3). Для оценки характера структурных изменений необходимо пользоваться соотношением (4).

Использование этих зависимостей позволяет оптимизировать процессы деформационного упрочнения и упруго-вязко-пластического формоизменения и калибровки.

Список литературы: 1. *Дрозд М. С.* Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / *М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин*. – М.: Машиностроение, 1986. – 220 с. **2.** *Евдокимов В. Д.* Технология упрочнения машиностроительных материалов / *В. Д. Евдокимов, Л. П. Клименко, А. Н. Евдокимова* // Учебное пособие-справочник.– 2-е изд-е. – К. : ИД «Профессионал, 2006. – 352 с. **3.** *Майборода В. П.* Скоростное деформирование конструкционных материалов / *В. П. Майборода, А. С. Кравчук, Н. Н. Холин*. – М.: Машиностроение, 1986. – 264 с.

4. *Добровольский А. Г.* Абразивная износостойкость материалов / *А. Г. Добровольский, П. И. Кошеленко* //Справочное пособие. – К.: «Тэхника», 1989. – 124 с.

Bibliography (transliterated):1. *Drozd M. P.* Inzhenernye raschety uprugoplasticheskoj kontaktnoj deformacii *M. P. Drozd, M.\M.\Matlin, Yu. I. Sidyakin*. – Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 220 P. **2.** *Evdokimov V. D.* Tehnologiya uprochneniya mashinostroitel'nyh materialov *V. D. Evdokimov, L. P. Klimenko, A. N. Evdokimova* Uchebnoe posobie-spravochnik. – 2-e izd-e. – Kiev. : ID «Professional, 2006. – 352 P. **3.** *Majboroda V. P*. Skorostnoe deformirovanie konstrukcionnyh materialov *V. P. Majboroda, A. P. Kravchuk, N. N. Holin*. – Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 264 P. **4.** *Dobrovol'skij A. G.* Abrazivnaya iznosostojkost' materialov *A. G. Dobrovol'skij, P. I. Koshelenko* Spravochnoe posobie. – Kiev.: «Tehnika», 1989. – 124 P.

Поступила (received) 31.10.2014

УДК 621.73

Р. С. НИКОЛЕНКО, аспирант, ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫПУКЛЫХ ОСАДОЧНЫХ ВСТАВОК НА ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ПРИ ЭКСЦЕНТРИЧНОЙ ОСАДКЕ ЗАГОТОВОК РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТЫ

Выполнено моделирование методом конечных элементов (МКЭ) процесса эксцентричной осадки выпуклыми вставками при фиксированном значении эксцентриситета вертикальных осей заготовки и инструмента. Исследование проводили с использованием пакета для конечно-элементного анализа Deform 3D. Получены графические зависимости силы осадки заготовки от степени обжатия, геометрических характеристик деформирующего инструмента и деформируемой заготовки при различных величинах эксцентриситета.

Ключевые слова: заготовка, профилирование, выпуклые вставки, эксцентриситет, усилие.

Введение. Внедрение предварительных профилирующих операций для достижения приближения формы заготовки к конфигурации поковки при штамповке [1] получило широкое распространение в современной кузнечно-штамповочной отрасли и весьма перспективно с точки зрения дальнейшего развития технологий. Подготовка формы заготовки позволяет перераспределить силовые режимы по переходам, улучшить заполнение ручьев, снизить давление на контакте инструмента и заготовки, обеспечив равномерное напряженно-деформированное состояние инструмента. Введение предварительного профилирования позволяет в 1,4…2,0 раза повысить стойкость окончательных ручьев штампов [2].

Анализ последних исследований и публикаций. Осадка выпуклыми продолговатыми вставками достаточно изучена как с точки зрения развития формоизменения [3], так и с точки зрения изменений напряжённо-деформированного состояния [4]. Исследование процесса предварительного профилирования заготовок эксцентричной осадкой выпуклыми вставками перед последующей штамповкой проведены авторами в работах [5–7], где исследовано влияние формы деформирующего инструмента на напряжённо-деформированное состояние (НДС) и приведены значения макропоказателей

© Р. С. Николенко, 2014

формоизменения при различных геометрических характеристик бойков. В работе [8] установлено положительное влияние выбранной конфигурации выпуклых вставок при предварительном профилировании в технологии штамповки поковок пластин на силовые режимы при окончательном формоизменении. При этом профилировании выпуклыми вставками возможно осуществлять в широком диапазоне эксцентриситета внедрения бойков в заготовки с различным отношением высоты к диаметру. Однако, влияние геометрических характеристик заготовок, выпуклых осадочных вставок и величины эксцентриситета при профилирующей осадке до настоящего времени не изучено.

Цель исследований. Целью работы является изучение влияния геометрических параметров выпуклых осадочных продолговатых вставок при пластической осадке с нулевым и максимально доступным (1/4 диаметра заготовки) эксцентриситетом внедрения данных плит в торец заготовки на энергосиловые показатели.

Изложение основного материала. Исследование проводили с использованием пакета для конечно-элементного анализа Deform 3D (лицензия № 8145). Объектом моделирования был процесс осадки цилиндрической заготовки с диаметром D_0 = 50 мм, высотой H_0 = 50 мм и H_0 = 100 мм (отношение H_0 / D_0 = 1,0 и 2,0). Материал заготовки – сталь 45 (AISI 1045), при этом модель упрочнения, также как и граничные условия, предложенными пакетом. Температурные режимы принимали изотермическими, температура деформации 1100°С. Заданное количество конечных элементов составляло 10000 шт., однако после генерации сетки количество элементов было принято 7847 шт. Коэффициент контактного трения, согласно рекомендациям источника [9], принимали f = 0,3.

Моделировали процесс осадки заготовки до относительных степеней обжатия $\varepsilon_h = (\Delta h / H_0) \times 100\% = 50\%$, где $\Delta h = (H_0 - H)$ – величина хода инструмента (абсолютное обжатие), мм, здесь H – минимальное расстояние между выпуклыми вставками после осадки (рис. 1). Значение эксцентриситета при осадке, т.е. несовпадение оси заготовка и вертикальной оси осадочных плит, принимали e = 0 мм и e = 12,5 мм (рис. 2). Для установления влияния геометрических параметров на энергосиловые показатели осадки рассматривали вариант деформирования с различным радиусом R выпуклости вставок и с ограничением высоты выпуклости профиля плиты от максимальной величины $h_{p.max} = R$ до минимального значения $h_{p.min} = R/4$. Радиусы выпуклости вставок: R = 30 мм; 50 мм; 75 мм и 112,5 мм, т.е. относительный радиус составлял R / D_0 = 0,6; 1,0; 1,5 и 2,25.

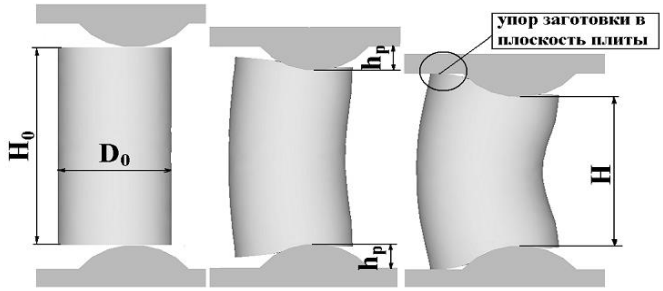
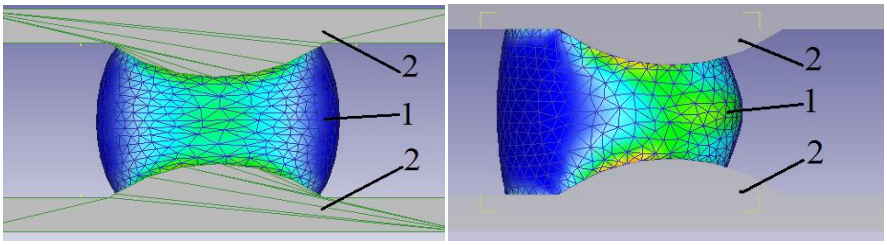


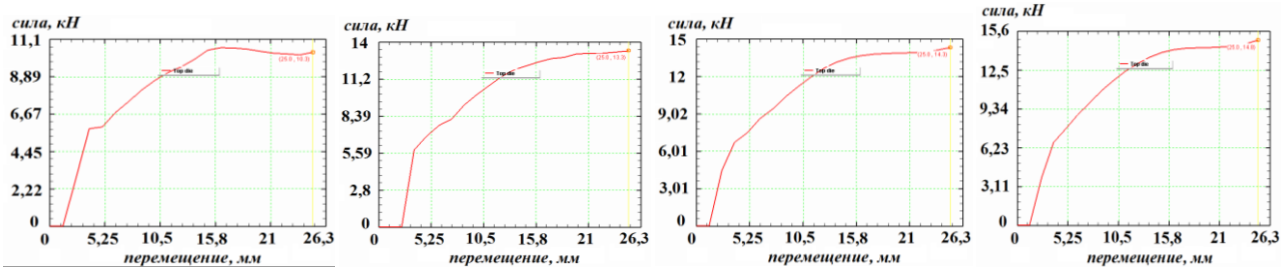
Рис. 1 – Процесс осадки с искусственным упором



а б

Рис. 2 – Твердотельная модель заготовки (1) после осадки выпуклыми бойками (2): а – без эксцентриситета e = 0; б – с эксцентриситетом e = 0,25

В пакете Deform были построены графики изменения силы осадки заготовок с различными значениями относительного радиуса R / D_0 (рис. 3).



а б в г

Рис. 3 – Графики изменения силы осадки заготовки с H_0 = 50 без эксцентриситета при $h_{p.\max} = R$: а – R/D_0 = 0,6; б – R/D_0 = 1,0; в – R/D_0 = 1,5; г – R/D_0 = 2,25

В дальнейшем результаты моделирования были сведены в обобщённые графические зависимости силовых режимов осадки без эксцентриситета (рис. 4) и с эксцентриситетом (рис. 5) от степени обжатия.

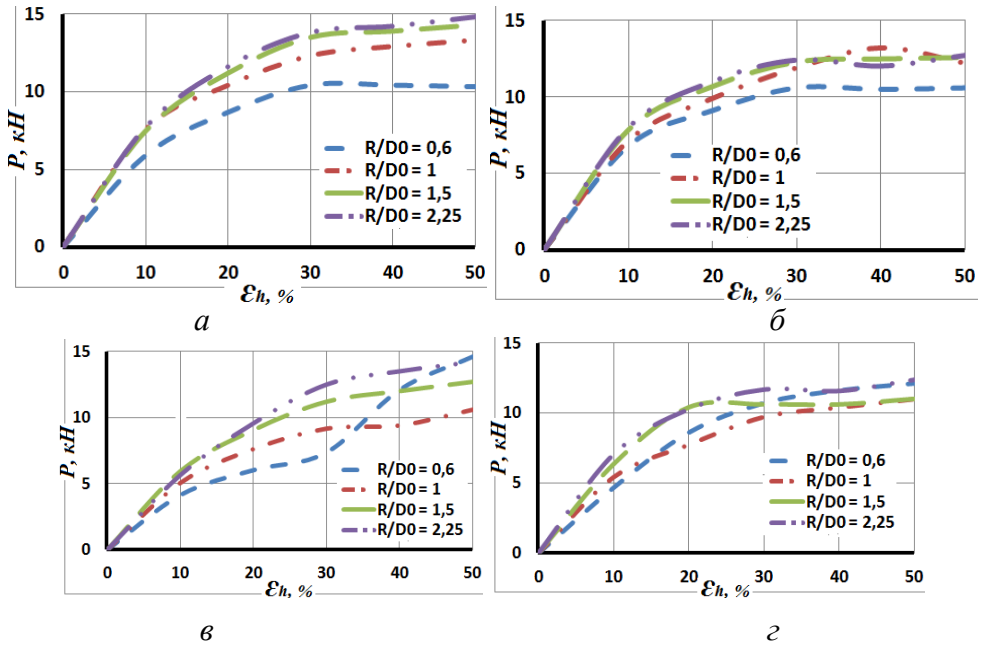


Рис. 4 – Графики зависимости силы осадки P от степени деформации ε_h при отсутствии эксцентриситета ($e = 0$): а – $h_{p.max} = R$, $H_0/D_0 = 1$; б – $h_{p.max} = R$, $H_0/D_0 = 2$; в – $h_{p.min} = R/4$, $H_0/D_0 = 1$; г – $h_{p.min} = R/4$, $H_0/D_0 = 2$

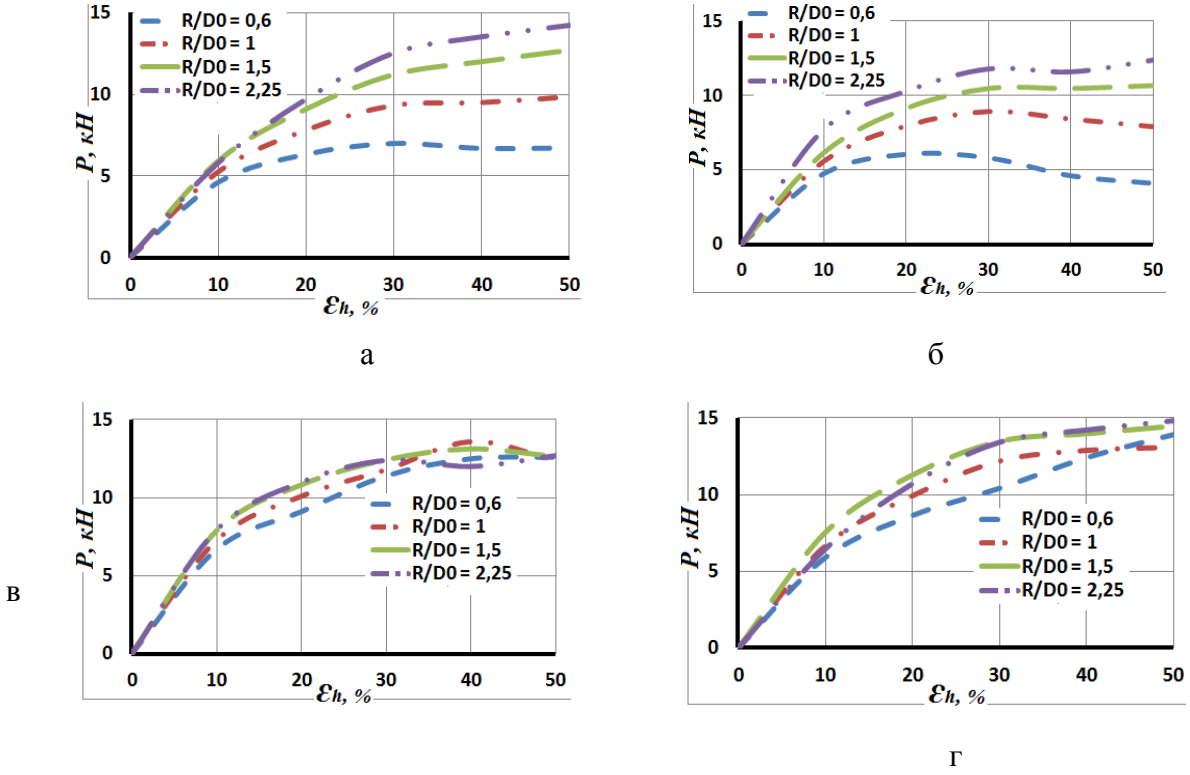


Рис. 5 – Графики зависимости силы осадки P от степени деформации ε_h с максимальным значением эксцентриситета ($e = 0{,}25D_0$): а – $h_{p.max} = R$, $H_0/D_0 = 1$; б – $h_{p.max} = R$, $H_0/D_0 = 2$; в – $h_{p.min} = R/4$, $H_0/D_0 = 1$; г – $h_{p.min} = R/4$, $H_0/D_0 = 2$

Из графиков, представленных на рис. 4 и рис. 5 видно, что применение искусственного ограничения выпуклости профиля плиты от максимального $h_{p.max} = R$ до минимального значения $h_{p.min} = R/4$ приводит к возрастанию необходимой силы для осадки при значениях R/D_0 = 0,6 и 1,0. Это связано с возникновением дополнительных поверхностей контакта заготовки с плоскостью плиты при $h_{p.min} = R/4$, т.е. с увеличением площади контактной поверхности. При значениях R/D_0 = 1,5 и 2,25, в случае ограничения профиля плиты, контакта заготовки с плоской поверхностью деформирующего инструмента не возникает.

Выводы. Таким образом, с использованием МКЭ изучено влияние геометрических параметров и высоты заготовок при осадке выпуклыми вставками (бойками) с эксцентриситетом внедрения в торцы заготовок и без него. Выявлено, что ограничение выпуклости профиля приводит к возрастанию площади контакта деформированной заготовки с радиусными вставками, что приведёт к возрастанию силы осадки. Увеличение радиусности значения R/D_0 для выпуклых вставок также приводит к возрастанию силы деформирования. Исследование силовых режимов на операциях предварительного профилирования позволит, в перспективе, уточнить методику выбора прессового оборудования по предельной номинальной силе и допускаемым нагрузкам в исполнительном механизме при автоматических режимах многоручьевой штамповки с совмещением профилирующих и штамповочных операций за один ход пресса.

Список литературы. 1. Технологія кування / *Л. М. Соколов, І. С. Алієв, О. Є. Марков, Л. І. Алієва.* – Краматорськ: ДДМА, 2011. – 268 с. **2.** *Довнар С. А.* Термомеханика упрочнения и разрушения штампов объёмной штамповки / С. *А. Довнар.* – М.: Машиностроение, 1975. – 254 с. **3.** *Кухарь В. В.* Моделирование формоизменения металла при осадке цилиндрических заготовок выпуклыми продолговатыми плитами / *В. В. Кухарь, С. А. Короткий, В. А. Бурко* // Вісник Хмельницького нац. ун–ту. – Хмельницький, 2008. – № 5. – С. 204–208. **4.** *Кухарь В. В.* Влияние радиусности выпуклых продолговатых осадочных плит на деформированное состояние и степень использования запаса пластичности при кузнечной осадке / *В. В. Кухарь* // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск, 2012. – № 1 (30). – С. 105–111. **5.** *Кухарь В. В.* Исследование напряженно–деформированного состояния заготовок при профилировании выпуклыми плитами с эксцентриситетом нагрузки / *В. В. Кухарь, Р. С. Николенко* // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2012. – № 3. – С. 132–136. **6.** *Кухарь В. В.* Исследование формоизменение заготовок при профилировании выпуклыми плитами с эксцентриситетом нагрузки / *В. В. Кухарь, Б. С. Каргин, Р. С. Николенко* // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харьков: НТУ «ХПІ», 2012. – № 46. – С. 71–76. **7.** *Кухарь В. В.* Анализ процесса осадки заготовок коническими плитами методом смещённых объёмов / *В. В. Кухарь, Р. В. Суглобов, Б. С. Каргин, Р. С. Николенко* // Захист металургійних машин від поломок: Зб. Наук. Пр. – Маріуполь, 2012. № 14. – С. 63–66. **8.** *Кухарь В.В.* Расширение технологических возможностей и преимущества предварительного профилирования выпуклыми вставками в процессе горячей объёмной штамповки поковок пластин / *В.В. Кухарь, Р.С. Николенко, Р.В. Суглобов* // Известия МГТУ «МАМИ»: Научный рецензируемый журнал. Серия 2. Технология машиностроения и материалы. – М., МГТУ «МАМИ», 2013. – №2(16), т.2. – С. 71–76.

9. *Грудев А. П.* Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник / *А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик.* – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.

Bibliography (transliterated):1. Tehnologija kuvannja L. M. Sokolov, I. S. Alієv, O. Є. Markov, L. I. Alієva. – Kramators'k : DDMA, 2011. – 268 p. **2.** Dovnar S. A. Termomehanika uprochnenija i razrushenija shtampov ob"yomnoi shtampovki S. A. Dovnar. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 254 p. **3.** Kuhar' V. V. Modelirovanie formoizmenenija metalla pri osadke cilindricheskih zagotovok vypuklymi prodolgovatymi plitami V. V. Kuhar', S. A. Korotkii, V. A. Burko Visnik Hmel'nic'kogo nac. un–tu. – Hmel'nic'kii, 2008. – No 5. – P. 204–208. **4.** Kuhar' V. V. Vlijanie radiusnosti vypuklyh prodolgovatyh osadochnyh plit na deformirovannoe sostojanie i stepen' ispol'zovanija zapasa plastichnosti pri kuznechnoi osadke V. V. Kuhar' Obrabotka materialov davleniem: sb. nauch. tr. DGMA. – Kramatorsk, 2012. – No 1 (30). – P. 105–111. **5.** Kuhar' V. V. Issledovanie naprjazhenno–deformirovannogo sostojanija zagotovok pri profilirovanii vypuklymi plitami s yekscentrisitetom nagruzki V. V. Kuhar', R. S. Nikolenko Problemi tribologiї (Problems of Tribology). – 2012. – No 3. – P. 132–136. **6.** Kuhar' V. V. Issledovanie formoizmenenie zagotovok pri profilirovanii vypuklymi plitami s yekscentrisitetom nagruzki V. V. Kuhar', B. S. Kargin, R. S. Nikolenko Visnik Nacional'nogo tehnichnogo universitetu «HPI»: Zbirnik naukovih prac'. Tematichnii vipusk: Novi rishennja v suchasnih tehnologijah. – Kharkov: NTU «HPI», 2012. – No 46. – P. 71–76. **7.** Kuhar' V. V. Analiz processa osadki zagotovok konicheskimi plitami metodom smeshyonnyh ob"yomov V. V. Kuhar', R. V. Suglobov, B. S. Kargin, R. S. Nikolenko Zahist metalurgiinih mashin vid polomok: Zb. Nauk. Pr. – Mariupol', 2012. No 14. – P. 63–66. **8.** Kuhar' V.V. Rasshirenie tehnologicheskih vozmozhnostei i preimushestva predvaritel'nogo profilirovanija vypuklymi vstavkami v processe gorjachei ob"yomnoi shtampovki pokovok plastin V.V. Kuhar', R.S. Nikolenko, R.V. Suglobov Izvestija MGTU «MAMI»: Nauchnyi recenziruemyi zhurnal. Serija 2. Tehnologija mashinostroenija i materialy. – Moscow, MGTU «MAMI», 2013. – No2(16), t.2. – p. 71–76. **9.** Grudev A. P. Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem: spravochnik A. P. Grudev, YU. V. Zil'berg, V. T. Tilik. – Moscow: Metallurgija, 1982. – 312 p.

Поступила (received) 28.10.2014

УДК 621.7.011

В. А. ОГОРОДНИКОВ, докт. техн. наук, зав. каф., ВНТУ;
А. В. ГРУШКО, докт.техн. наук, дир. ИнМАД ВНТУ;
А. В. ГУЦАЛЮК, аспирант, ВНТУ, Винница

ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ ИСПОЛЬЗОВАННОГО РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Приведены результаты исследований пластичности металлов при объемном напряженном состоянии. Показано влияние инвариантов тензора напряжений на пластичность. При этом процесс нагружения образцов рассматривается в пространстве трех безразмерных инвариантных характеристик напряженно-деформированного состояния. Показано, что на пластичность оказывает влияние первая и вторая производная от показателей напряженного состояния. Показано также, что критерии деформируемости, основанные на линейной теории накопления повреждений, дают существенное отклонение между результатами расчета и экспериментом.

Ключевые слова: критерий, кривизна пути деформирования, ресурс пластичности, траектория деформирования

Введение. При изготовлении заготовок методами обработки давлением на поверхности, или в середине деформируемого металла могут возникать макротрещины, или напротив запас пластичности используется недостаточно.

© В. А. Огородников, А. В. Грушко, А. В. Гуцалюк, 2014

Использованный ресурс пластичности в таком случае является мерой качества и его прогнозирование на стадии проектирования технологических процессов является актуальной задачей теории обработки металлов давлением.

Надежное проектирование технологии, выбор параметров технологических процессов, обеспечивающих качество продукции металлообработки, можно осуществить путем применения феноменологических критериев разрушения, позволяющих оценивать использованный ресурс пластичности. Однако применение этих критериев для расчета предельного формоизменения в процессах обработки давлением, сопровождающихся объемной схемой напряженного состояния вызывает трудности методического характера.

Феноменологические критерии разрушения включают в себя подынтегральные функции зависимости предельных до разрушения деформаций e_p от показателей напряженного состояния. Такие функции $e_p = f(\eta)$ – называют диаграммой пластичности. В работе [1] показано, что диаграммы пластичности $e_p = f(\eta)$ не являются едиными для различных напряженных состояний. Вопрос о влиянии истории деформирования на пластичность в условиях объемного напряженного состояния не достаточно изучен.

Настоящая работа посвящена анализу современных феноменологических критериев деформируемости, применяемых для оценки использованного ресурса пластичности в процессах обработки металлов давлением, сопровождающихся объемной схемой напряженного состояния.

Анализ экспериментальных исследований. Рассмотрим результаты экспериментальных исследований пластичности сталей Р18, Р9, 45 полученные в работе [1] путем испытания образцов на совместное кручение с растяжением на фоне переменного гидростатического давления. При этом реализованы траектории $\eta = const$ и $\frac{d\eta}{de_u} > 0$ и $\frac{d\eta}{de_u} < 0$ (η – безразмерный показатель напряженного состояния, равный отношению гидростатического давления к интенсивности напряжений).

Расчет предельных до разрушения степеней деформации проводили по феноменологическим критериям:

Г. А. Смирнова-Аляева [2]

$$\psi = \frac{e_{\text{и}}}{e_{\text{р}}(\eta)} \le 1 \,, \tag{1}$$

В. Л. Колмогорова [3]

$$\psi = \int_0^t \frac{\bar{\varepsilon}_{\text{и}} d\tau}{e_{\text{р}}(\eta)} \le 1 \tag{2}$$

и В. А. Огородникова [1]

$$\psi = \int_0^{e_{\text{р}}^*} \left(1+0,2\operatorname{arctg}\frac{d\eta}{de_{\text{и}}}\right) \frac{e_{\text{и}}^{0,2\operatorname{arctg}\frac{d\eta}{de_{\text{и}}}}}{\left[e_{\text{р}}(\eta,\chi)\right]^{1+0,2\operatorname{arctg}\frac{d\eta}{de_{\text{и}}}}} de_{\text{и}} \le 1 \ . \qquad (3)$$

В критериях (1), (2) и (3) – $e_{\text{и}} = \int_0^t \bar{\varepsilon}_{\text{и}} d\tau$ – накопленная интенсивность деформаций;

$\bar{\varepsilon}_{\text{и}}$ – интенсивность скоростей деформаций; t – время деформирования;

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3 \cdot I_2(D_\sigma)}} = \frac{3\sigma}{\sigma_{\text{и}}} \quad , \qquad (4)$$

где η – показатель напряженного состояния; $I_1(T_\sigma)$ – первый инвариант тензора напряжений;

$I_2(D_\sigma)$ – второй инвариант девиатора напряжений.

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3 \cdot I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3}}{\sigma_{\text{и}}} \ , \qquad (5)$$

где χ – показатель напряженного состояния, учитывающий третий инвариант тензора напряжений;

$$\sigma = \frac{\sigma_{ij}\delta_{ij}}{3} \ , \qquad (6)$$

где σ – среднее напряжение (гидростатическое давление).

Показатель η введен в работе [2], показатель χ в работе [1].

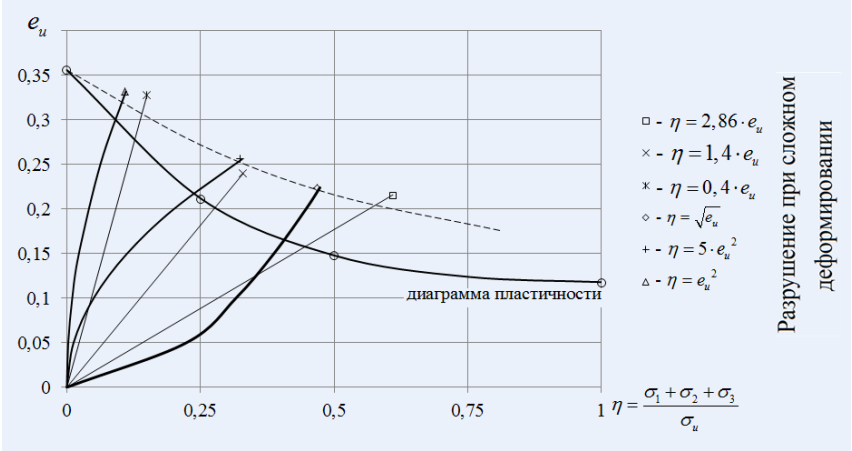


Рис. 1 – Влияние истории деформирования на пластичность стали Р18 [1]

В работе [1] приведены экспериментальные данные о пластичности цилиндрических образцов из материалов не образующих шейку при растяжении (стали Р9, Р12, Р18). Цилиндрические образцы подвергали совместному кручению и растяжению на фоне изменяющегося

гидростатического давления, при этом возможно реализовать различные траектории деформирования $\eta = \eta(e_и)$, $\eta = const$, $\chi = const$, $\chi = \chi(e_и)$. На рис. 1 показаны пути деформирования $\eta = \eta(e_и)$, а также диаграмма пластичности стали Р18.

Результаты изложенного выше анализа экспериментальных данных указывают на заметное влияние скорости изменения показателя напряженного состояния в виде параметра $\frac{d\,\eta}{de_и}$. Если $\frac{d\,\eta}{de_и}$ возрастает, увеличивается влияние истории деформирования на величину предельных деформаций ($e_р$ выше по сравнению с величиной $e_р$ определенной по диаграмме пластичности). В случае изменения знака производной $\frac{d\eta}{de_и} < 0$ пластичность падает (по сравнению с величиной $e_р$ определенной по диаграмме пластичности). Заметим, однако, что функция $\eta = \eta(e_и)$ включает в себя переменность двух параметров – показателя η и кривизну траектории деформации $H = 1/\rho$ (следуя терминологии А. А. Ильюшина). С тем, чтобы выделить влияние каждого параметра в работе [1] получены зависимости кривизны траектории деформаций $\gamma = \gamma(e_z)$ от осевой деформации e_z для образцов, деформируемых в условиях сложной деформации $\eta = 2{,}86 \cdot e_и$, $\eta = \sqrt{e_и}$, $\eta = e_и^{\,2}$, $\eta = 1{,}4 \cdot e_и$. При указанных траекториях кривизна траектории деформации меняется от $H = 8$ до $H = 0{,}5$, величина предельных деформаций (см. рис. 2) слабо зависит от кривизны траектории деформаций. При этом показатель η меняется практически одинаково для путей деформирования $\eta = 2{,}86 \cdot e_и$, $\eta = \sqrt{e_и}$. Совпадение фактических деформаций при разрушении образцов $\eta = \sqrt{e_и}$ и $\eta = 2{,}86 \cdot e_и$, а также образцов $\eta = e_и^{\,2}$ и $\eta = 1{,}4 \cdot e_и$ позволяют предположить, что на пластичность основное влияние оказывает скорость изменения показателя η, а не кривизна траектории деформаций. Этот вывод можно отнести к траекториям малой или средней кривизны.

Главным преимуществом задания траекторий нагружения в пространстве безразмерных показателей напряженного состояния заключается в том, что в этом случае вид «пути деформирования» однозначно определяется условиями формоизменения, характерными заданного процесса и практически не зависят от механических свойств материала [1]. Это позволяет моделировать процессы обработки давлением на модельных материалах, в этом случае необходимо иметь кривые течения $\sigma_и = f(e_и)$ и диаграммы пластичности $e_р = f(\eta, \chi, \mu_\sigma)$ [5].

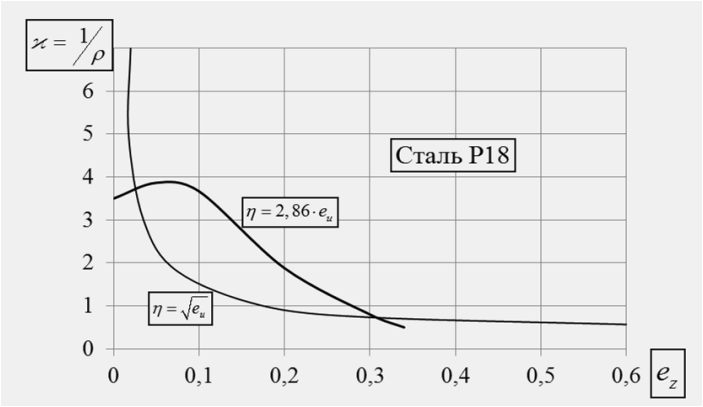


Рис. 2 – Зависимость кривизны траектории деформаций щ от осевой деформации e_z цилиндрических образцов, подвергаемых кручению совместно с растяжением [1]

Введем в рассмотрение коэффициент ω, отражающий влияние скорости изменения показателя напряженного состояния на пластичность

$$\omega = \frac{e_{\text{р}}(\eta)}{e_{\text{р}}(\eta = const)} \ . \qquad (7)$$

В формуле (7) $e_p(\eta)$ рассчитывают по критериям, или $e_p(\eta)$ – отражает фактическую деформацию в момент разрушения; $e_p(\eta = const)$ найдено по диаграмме пластичности в месте пересечения диаграммы пластичности с путем деформирования. Таким образом, коэффициент ω отражает влияние истории деформирования на пластичность в условиях объемного напряженного состояния.

Расчет предельных деформаций по критериям (1), (2), и (3) показал, что если параметр $\frac{d\eta}{de_{\text{и}}}$ возрастает, то растет отклонение фактических деформаций в момент разрушения от расчетных по различным критериям. Так, если $\frac{d\eta}{de_{\text{и}}}$ близко к нулю, все критерии дают одинаковый результат, отклонение от фактических деформаций лежат в пределах статистической погрешности, в случае, если $\frac{d\eta}{de_{\text{и}}} > 5$ наиболее близки результаты расчета к экспериментальным дает критерий (3). Критерий (2) показывает отклонение до 25%, критерий (1) до 30%.

На рис. 3, 4 показаны зависимости коэффициента ω от скорости изменения показателя напряженного состояния $\frac{d\eta}{de_{\text{и}}}$ для быстрорежущих сталей

Р9, Р18 и стали 45, а также зависимости коэффициента ω от кривизны деформирования $\frac{d^2\eta}{de_и^2}$.

Коэффициент ω_1 рассчитан по критерию (3), коэффициент ω_2 рассчитан по формуле (7), однако значение $e_р(\eta)$ в числители формулы (7) соответствует экспериментальным данным ($e_р(\eta)$ в момент разрушения).

Как видим, графики на рис. (3, а) и (3, б) практически совпали, что подтверждает более высокую точность расчетов предельных деформаций по критерию (3).

Анализ данных, приведенных на рис. 3, 4 позволяет сделать вывод о существенном влиянии скорости изменения показателя напряженного состояния $\frac{d\eta}{de_и}$ на пластичность. Так при $\frac{d\eta}{de_и} > 2$ влияние истории деформирования на пластичность достигает 23%, при этом кривизна траектории деформации $\frac{d^2\eta}{de_и^2}$ оказывает подобное влияние – с ростом кривизны возрастает влияние истории деформирования на пластичность.

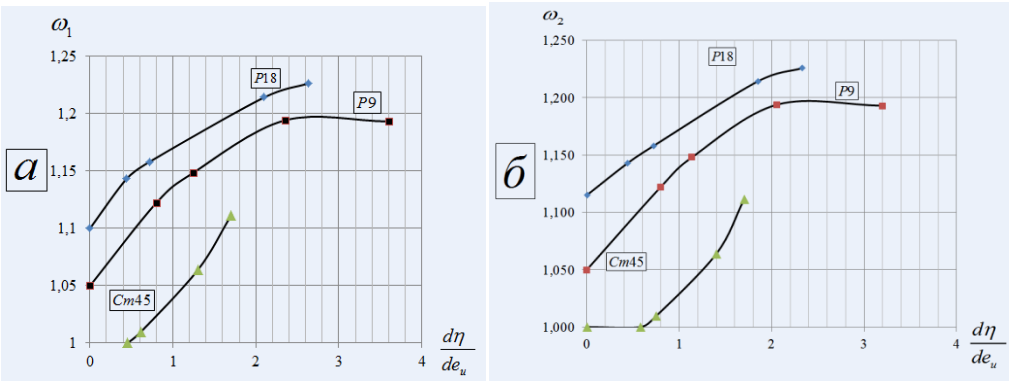


Рис. 3 – Влияние скорости изменения показателя напряженного состояния на пластичность в условиях объемного напряженного состояния

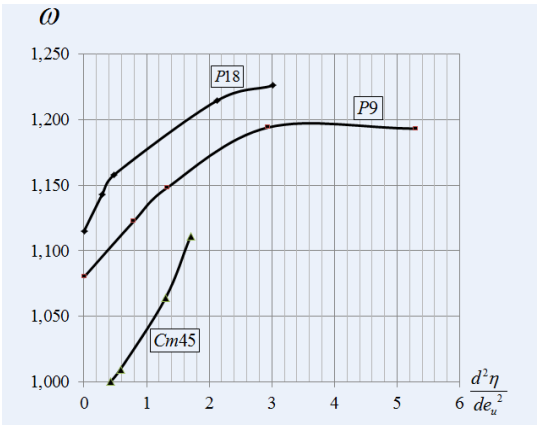


Рис. 4 – Влияние кривизны пути деформирования на пластичность в условиях объемного напряженного состояния

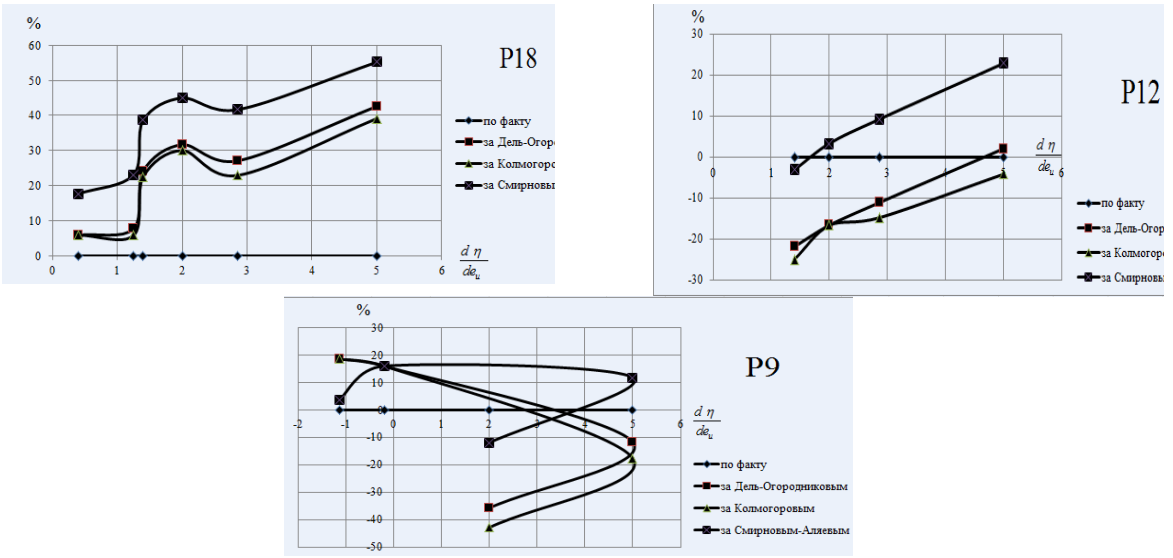


Рис. 5 – Результаты расчета по критериям (1), (2), (3), исходя из экспериментальных данных для прямых путей деформирования

На рис 5, 6 сопоставлены результаты расчета по критериям (1), (2), (3) с экспериментальными данными. Как следует из рис. 5, 6 наибольшее отклонение (55%) дает критерий Г. А. Смирнова-Аляева, минимальное отклонение дает критерий В. А. Огородникова (до 22%), критерий В. Л. Колмогорова до 45%.

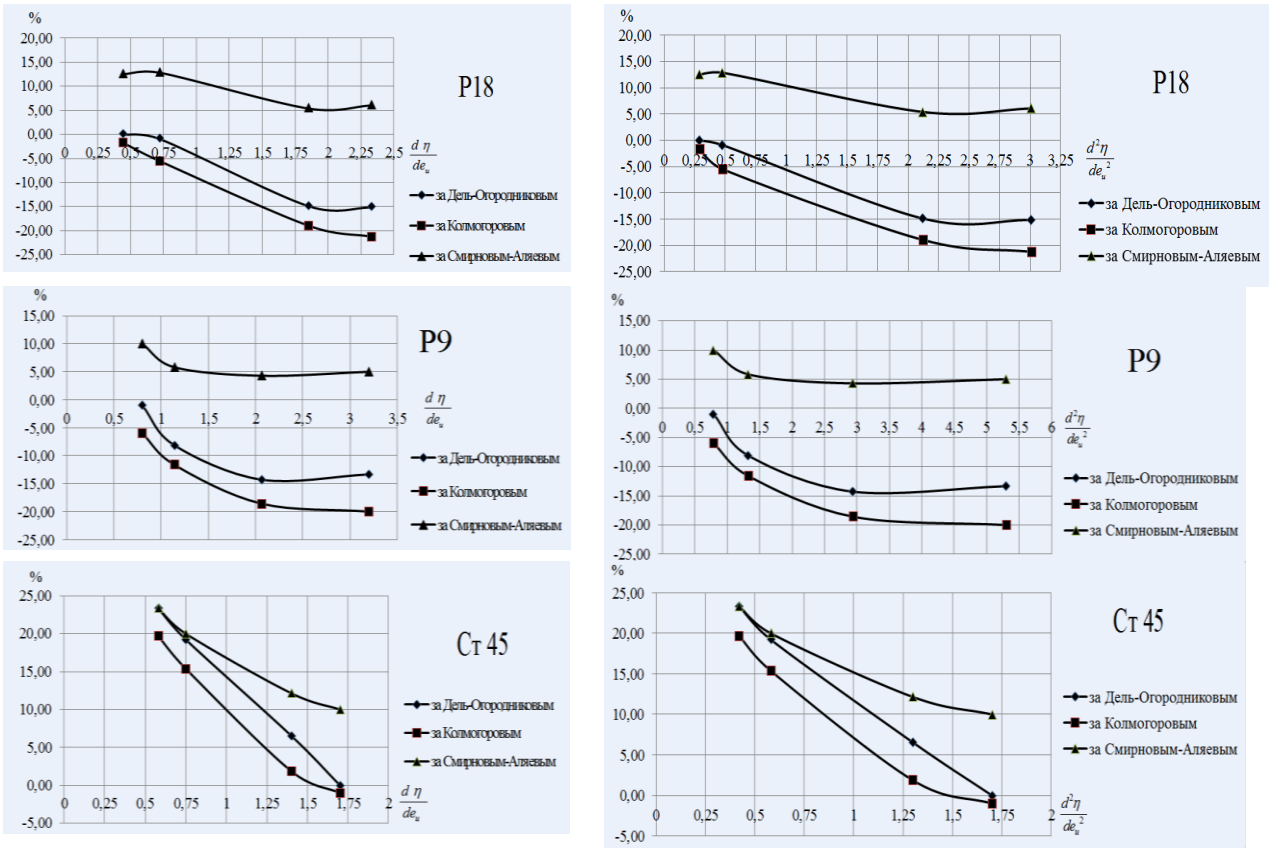


Рис. 6 – Результаты расчета по критериям (1), (2), (3), исходя из экспериментальных данных для кривых путей деформирования

Применение критериев для процесса ротационной ковки. Рассмотрим пример расчета использованного ресурса пластичности в процессе радиального обжатия. В процессе радиального обжатия металл находится в условиях объемного напряженного состояния. Сущность процесса заключается в деформировании заготовки коническими сходящимися штампами, обеспечивающими всестороннее пульсирующее приложение давлений. Благодаря благоприятной схеме напряженного состояния возможно обрабатывать заготовки из малопластичных, труднодеформируемых металлов и сплавов. Тем не менее, при определенных условиях деформирования заготовок из малопластичных материалов часто образуются трещины.

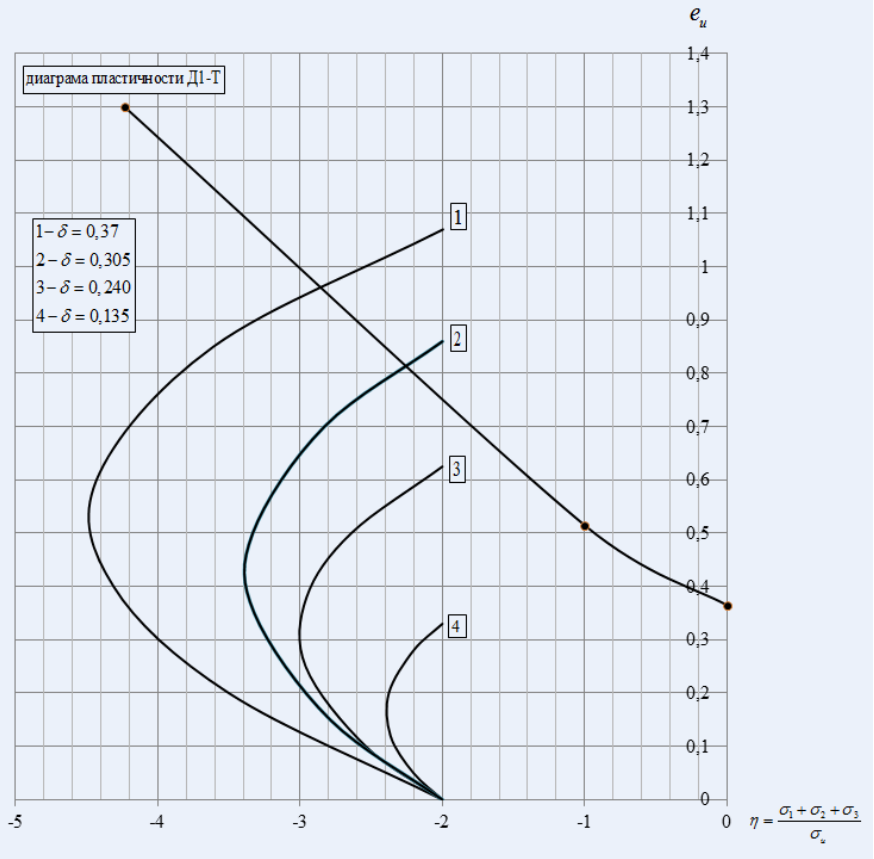


Рис. 7 – Пути деформирования частиц дюралюминия Д1-Т вдоль оси симетрии заготовок при ротационной ковке [1] (1, 2, 3, 4 – пути деформирования при разных обжатиях)

Экспериментально-расчетным методом твердости в работе [1] получены пути деформирования $\eta = f(e_и)$ частиц материала заготовок в опасной области для различных обжатий $\delta = \frac{d_0 - d}{d_0} = 0{,}135$, $\delta = 0{,}24$, $\delta = 0{,}305$, $\delta = 0{,}37$ (d_0, d – диаметр прутка до и после деформирования, d_0=20 мм).

На рис. 7 показаны пути деформирования $\eta = f(e_и)$, построенные для различных обжатий (кривые 1–4). Зависимости $\eta = f(e_и)$ аппроксимированы выражением

$$\eta = a \cdot e_и^{\,2} + в \cdot e_и + c \ , \qquad (8)$$

в котором *а, в, с* – коэффициенты аппроксимации.

Использованный ресурс пластичности ψ рассчитывали по критериям деформируемости (1), (2), (3). Анализ результатов расчета величины ψ по критериям (2) и (3) показал, что история деформирования при радиальном обжатии оказывает значительное влияние на предельную деформацию. В таблице приведены результаты расчета использованного ресурса пластичности ψ в зависимости от обжатия.

При обжатии $\delta = 0,37$ у заготовки травлением поперечного шлифа обнаружена трещина, что подтверждено расчетом ψ по критерию (3).

Таблица – Результаты расчета использованного ресурса пластичности ψ в зависимости от обжатия

Материал	Обжатие δ	Ресурс ψ	Расчетное значение ресурса пластичности			
			Расчет по (1)	Δ%	Расчет по (3)	Δ%
Дюралюминий Д1-Т	0,135	0,515			0,313	
	0,240	0,940			0,613	
	0,30	1,273			0,805	
	0,37	1,00 (трещина в центре заготовки)	1,621	62	0,981	1,6

Выводы. В условиях объемного напряженного состояния на пластичность оказывает влияние скорость изменения показателя напряженного состояния $\frac{d\eta}{de_и}$, а также кривизна пути деформирования $\frac{d^2\eta}{de_и^2}$. С увеличением параметра $\frac{d\eta}{de_и}$ пластичность возрастает по сравнению с диаграммой пластичности, построенной в условиях $\eta = const$, $\chi = const$.

Максимальное значение коэффициента влияния истории деформирования на пластичность достигает при значениях параметра $\frac{d\eta}{de_и} > 2$, при этом кривизна пути деформирования достигает $\frac{d^2\eta}{de_и^2} > 3$ для быстрорежущих сталей и $\frac{d^2\eta}{de_и^2} > 2$ для стали 45.

При значениях параметра $\frac{d\eta}{de_и}$ близким к нулю ($\eta = const$) целесообразно использовать критерий Г. А. Смирнова-Аляева (1) (например, формирование крутоизогнутых отводов, операций – гибка).

При значениях параметра $0,5 \le \frac{d\eta}{de_и} \le 1,75$ можно использовать критерий В. Л. Колмогорова (2). Применение этого критерия целесообразно, если кривизна пути деформирования находится в пределах $0,25 \le \frac{d^2\eta}{de_и^2} \le 2$.

В случае изменения параметра $\frac{d\eta}{de_и} \ge 2$ наибольшую точность дает критерий В. А. Огородникова (3). Применение этого критерия целесообразно, если кривизна пути деформирования находится в пределах $\frac{d^2\eta}{de_и^2} \ge 3$.

Список литературы: 1. *Огородников В. А.* Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / *В. А. Огородников* – Киев: Вища школа. Главное изд-во, 1983. – 175с. **2.** *Смирнов-Аляев Г.А.* Механические основы пластической обработки металлов / *Г.А. Смирнов-Аляев*. – Л.: Машиностроение, 1962. – 271с. **3.** *Колмогоров В.Л.* Напряжения. Деформации. Разрушение / *В.Л. Колмогоров* – М.: Металлургия, 1970. – 272 с.**4.** *Ильюшин А.А.* Труды (1946-1966). Т .2. Пластичность /Составители *Е.А.Ильюшина, М.Р.Короткина*. – М.:Физмат. лит. 2004 – 480с. – ISBN5-9221-0364-4. **5.** *Огородников В.А.* Моделирование процессов обработки давлением на основе гипотезы о силовом и кинематическом подобии параметров деформирования / *В. А. Огородников, А.В.Грушко, И.А. Деревенько* // Обработка материалов давлением, сб. научных трудов, №4(33) 2012, Краматорск, ДТМА – с. 46-52. **6.** *Сивак И.О.* Пластичность металла при плоком напряженном состоянии / *И.О. Сивак* // В сб. научн. тр. Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – Вып. 4. – Краматорск, 1998. – с.254 – 257.

Bibliography (transliterated): 1. *Ogorodnikov V. A.* Otsenka deformiruemosti metallov pri obrabotke davleniem / *V. A. Ogorodnikov* – Kiev: Vischa shkola. Glavnoe izd-vo, 1983. – 175 P. **2.** *Smirnov-Alyaev G.A.* Mehanicheskie osnovyi plasticheskoy obrabotki metallov / *G.A. Smirnov-Alyaev*. – Leningrad: Mashinostroenie, 1962. – 271 P. **3.** *Kolmogorov V.L.* Napryazheniya. Deformatsii. Razrushenie / *V.L. Kolmogorov* – Moscow: Metallurgiya, 1970. – 272 P. **4.** *Ilyushin A.A.* Trudyi (1946-1966). T .2. Plastichnost /Sostaviteli *E.A.Ilyushina, M.R.Korotkina.* – Moscow: Fizmat. lit. 2004 – 480 P. **5.** *Ogorodnikov V.A.* Modelirovanie protsessov obrabotki davleniem na osnove gipotezyi o silovom i kinematicheskom podobii parametrov deformirovaniya / *V. A. Ogorodnikov, A.V.Grushko, I.A. Derevenko* // Obrabotka materialov davleniem, sb. nauchnyih trudov, No 4(33) – 2012, Kramatorsk, DTMA – P. 46–52. **6.** *Sivak I.O.* Plastichnost metalla pri plokom napryazhennom sostoyanii / *I.O. Sivak* // V sb. nauchn. tr. Sovershenstvovanie protsessov i oborudovaniya obrabotki davleniem v metallurgii i mashinostroenii. – Vyip. 4. – Kramatorsk, 1998. – P. 254–257.

Поступила(received) 04.11.2014

УДК 621.77.01

Ю. Г. РОЗОВ, канд. техн. наук, доц., ХНТУ, Херсон

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЁТОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПРОФИЛИРОВАННОЙ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В работе предложен и реализован способ получения длинномерной трубчатой заготовки (ствольной заготовки) из короткой заготовки методом гидроэкструзии на подвижной гладкой оправке в среде высокого гидростатического давления. Предложены новые технологии получения прецизионной толстостенной трубчатой заготовки с внутренними винтовыми канавками на примере изготовления нарезного ствола с полигональным профилем, включающие: двухпроходный процесс; прессование-волочение. Впервые разработана методика определения НДС стволов стрелкового оружия с нарезной внутренней поверхностью разной формы.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, метод конечных элементов, оправка, гидроэкструзия, гидростатическое давление, обжатие, волочение, коническая матрица, продольная стойкость, прочность.

Введение. Толстостенные трубчатые изделия с прецизионными элементами внутреннего профиля (6…8 квалитет, при шероховатости 0.16…0.64 мм) достаточно широко применяются в машиностроении, приборостроении и изделиях специального назначения.

Типовым примером изделий специального назначения могут служить стволы артиллерийского и стрелкового оружия (СО). Технология их изготовления предусматривает две стадии:

1. Получение глубокого отверстия с указанными геометрическими параметрами внутренней поверхности.
2. Получение на внутренней поверхности профильных элементов.

Чаще всего канал в заготовке ствола производится по схеме: предварительное сплошное сверление, развёртывание, чистовое развёртывание. В качестве финишных операций, применяют хонингование или протягивание, а в последнее время – электрохимическую обработку [1].

При профилировании канала ствола методами, основанными на холодном пластическом деформировании металла, не всегда обеспечивается желаемое качество канала, а методы профилирования не являются универсальными и имеют ряд существенных недостатков.

Целью работы является развитие существующих и создание новых научно обоснованных, обеспечивающих повышение технико-экономических показателей, технологических процессов изготовления длинномерных

© Ю. Г. Розов, 2014

трубчатых ствольных заготовок и стволов СО с оптимальным профилем внутренней поверхности ведущей части канала, основанных на холодном пластическом деформировании металлов.

Ввиду низкой пластичности ствольных сталей, традиционное холодное выдавливание не обеспечивает необходимой степени деформации без разрушений. Поэтому, для повышения пластичности сталей при холодном формообразовании изделий используют схемы выдавливания в условиях напряжённо-деформированного состояния (НДС) всестороннего неравномерного сжатия при деформации в среде высокого гидростатического давления или гидропрессование (гидроэкструзию).

В результате анализа предложен и рассмотрен перспективный метод получения высокоточных трубчатых изделий с повышенными эксплуатационными свойствами (например, ствольных заготовок) методом гидропрессования на подвижной гладкой оправке [2].

Анализ гидропрессования трубчатых заготовок из стали 30ХН2МФА с подвижной гладкой оправкой проводили методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программного комплекса DEFORM^{TM}-3D.

По результатам компьютерного моделирования было определено НДС изготовляемых деталей, необходимое гидростатическое давление, которое обеспечит деформирование в холодном состоянии для сталей 30ХН2МФА и 20Х17Н2 без разрушений (соответственно – 750 МПа и 700 МПа), конечную геометрию изделия, распределение удельных усилий на поверхности заготовки в месте контакта с инструментом, а также силовые параметры процесса.

Исходя, из полученных данных компьютерного моделирования был разработан технологический процесс получения ствольной заготовки, спроектирована и изготовлена оснастка и реализован процесс гидроэкструзии ствольных заготовок на гладкой подвижной оправке [3]. Сравнение экспериментальных данных с результатами, полученными расчётным путём, показало их совместимость в пределах 10%, что подтвердило адекватность полученных расчётов.

Разработанная технология получения ствольных заготовок позволяет снизить себестоимость изготовления изделий и повысить продуктивность производства стволов СО, за счёт исключения из технологического процесса методов получения заготовок на специальном оборудовании.

Предложены новые технологии получения прецизионной толстостенной трубчатой заготовки с внутренними винтовыми канавками на примере изготовления ствола СО с полигональным профилем:

- двухпроходной процесс, основанный на обжатии ствольной заготовки по профильной оправке неприводными роликами [4];

- обжатие ствольной заготовки с профильной оправкой в гладкой конической матрице с фиксацией (центрированием) заготовки по калибрующему пояску по трём вариантам: без ограничения, с одно– и двухсторонним ограничением течения металла по длине [5].

Для формирования полигонального профиля внутренней поверхности ствольной заготовки методом обжатия неприводными роликами создавалась роликовая волока (замкнутый калибр), через которую проталкивалась ствольная заготовка с профильной оправкой. Процесс осуществляется за два прохода, так как ввиду неизбежного наличия зазора между роликами (валками), при однократном проходе получается огранка заготовки, для устранения которой требуется дополнительный второй проход с предварительным поворотом полуфабриката после первого прохода на 45^0 (рис. 1).

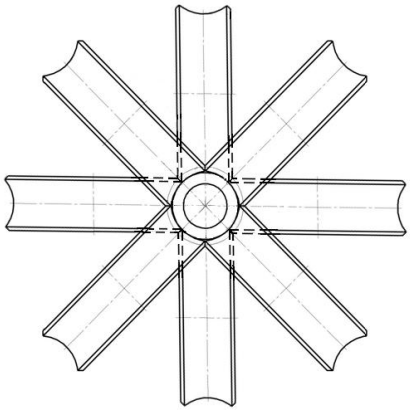


Рис.1 – Схема обжатия ствольной заготовки между роликами

Для изучения процесса профилирования внутренней поверхности ствольной заготовки, полученной обжатием по оправке неприводными роликами (валками), определения параметров НДС, усилий на ролики (валки) и крутящих моментов, знание которых необходимо для проектирования технологического устройства, использовался пакет прикладных программ DEFORM^{MT}-3D на основе МКЭ.

Также проведено компьютерное моделирование процесса изготовления ствола с профилем полигонального типа проталкиванием-волочением ствольной заготовки с профильной оправкой через гладкую коническую матрицу (рис. 2), с помощью пакета прикладных программ DEFORM-3D, основанного на использовании МКЭ.

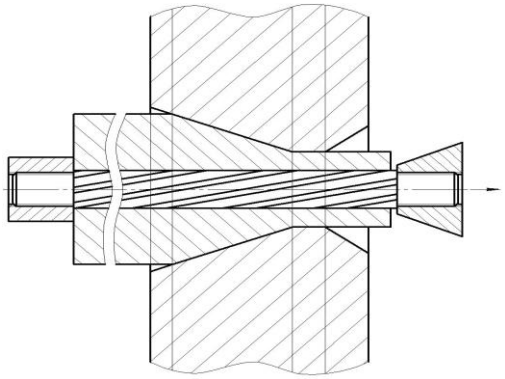


Рис.2 – Схема обжатия ствольной заготовки в конической матрице

Моделирование проводилось для обжатия в конической матрице с различными рабочими углами с фиксацией (центрированием) заготовки по калибрующему пояску без ограничения (сталь 30ХН2МФА), с одно- (сталь 30ХН2МФА и сталь 10) и двухсторонним (сталь 30ХН2МФА) ограничением течения металла по длине. Результаты анализа показали приемлемость использования предложенного способа для изготовления ствола с профилем полигонального типа проталкиванием-волочением ствольной заготовки с профильной оправкой через гладкую коническую матрицу без ограничения течения металла по длине заготовки и с односторонним ограничением. Найдено оптимальное значение рабочего угла конической матрицы при обжатии трубчатой заготовки в указанных процессах, которое составило 10^0.

Рассмотрена продольная устойчивость при осевом сжатии составного бруса, состоящего из цилиндрического стержня (оправки), вставленного внутрь цилиндрической трубы (заготовки), в области упругих и пластических деформаций для различных схем деформирования.

Рассматривая продольно-поперечный изгиб составного стержня «заготовка-оправка», получена формула для определения силы $P_{\Sigma}^{\text{кр}}$, при которой происходит потеря продольной устойчивости бруса, состоящего из цилиндрического стержня, вставленного внутрь цилиндрической трубы, в области упругих деформаций:

$$P_{\Sigma}^{\text{кр}} = \frac{\pi^3 E}{64\left(\nu_l l\right)^2}\left[D^4 - \frac{d^3}{D^3}\frac{\sigma_{\text{ПЦ}(1)}}{\sigma_{\text{ПЦ}}^{\text{ср}}}\left(D^4 - d^4\right)\right], \qquad (1)$$

где: E – модуль Юнга (принимаем $E_1=E_2=E$, т.е. материал заготовки и оправки – сталь);

$$\sigma_{\text{ПЦ}}^{\text{ср}} = \frac{d^2}{D^2}\left(\sigma_{\text{ПЦ}(1)} - \sigma_{\text{ПЦ}(2)}\right) + \sigma_{\text{ПЦ}(2)},$$

$\sigma_{\text{ПЦ}(1)}; \sigma_{\text{ПЦ}(2)}$ – пределы пропорциональности материалов внутреннего стержня (оправки) и наружной трубы (заготовки);

l – длина составного стержня;

v_l – коэффициент приведения длины стержней;

d – диаметр оправки (внутренний диаметр трубчатой заготовки);

D – наружный диаметр трубчатой заготовки

По аналогии определена величина критической силы при напряжениях, превышающих предел пропорциональности, т.е. когда в стержнях возникают пластические деформации (гибкость составного бруса меньше предельной), т.е. в области пластических деформаций:

$$P_{\Sigma(\text{пл})}^{\text{кр}} = \frac{\pi^2 E}{4(\nu_l l)^2}\left[D^4 - \frac{d^3}{D^3}\frac{\sigma_{\text{ПЦ}(1)}}{\sigma_{\text{ПЦ}}^{\text{ср}}}\left(D^4 - d^4\right)\right]\frac{\left[\frac{D^2}{16}\left(\alpha - \sin\alpha\cos\alpha\right) - e^2\left(\alpha - \sin\alpha\right)\right]}{D\left(D - 2e\right)}, \qquad (2)$$

где:

$$e = \frac{1}{2}\left[D - \frac{d^3}{D^3}\frac{\sigma_{\text{ПЦ}(1)}}{\sigma_{\text{ПЦ}}^{\text{ср}}}\left(D - d\frac{d^3}{D^3}\right)\right];$$

$$\alpha = 2\arccos\left[1 - \frac{d^3}{D^3}\frac{\sigma_{\text{ПЦ}(1)}}{\sigma_{\text{ПЦ}}^{\text{ср}}}\left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)\right];$$

$$\alpha = \pi\frac{\alpha^0}{180^0}.$$

Результаты анализа, проведенные расчёты и натурные эксперименты подтвердили тот факт, что при обжатии в конической матрице и неприводными роликами с проталкиванием, при длине ствола, превышающей некоторое критическое значение, возможна потеря продольной устойчивости ствольной заготовки вместе с оправкой в области, как упругих, так и пластических деформаций. Наиболее благоприятным, с точки зрения предотвращения потери осевой (продольной) устойчивости, может быть принято обжатие в роликовой волоке и в конической матрице по схеме волочения.

С помощью современных методов расчёта стволов СО была проведена проверка эффективности новых технологий их изготовления [6].

Впервые разработана методика определения НДС стволов СО с нарезной внутренней поверхностью различной формы, находящихся под воздействием внутреннего статического и динамического нагружения, основанная на использовании МКЭ. Данный расчёт был проведен с использованием компьютерной программы ANSYS.

Проведен расчёт параметров НДС ствола и оболочки пули при их взаимодействии в процессе выстрела. Рассматривалось динамическое взаимодействие пули с внутренней профилированной поверхностью ствола пистолета-пулемёта нарезного и полигонального типа. Анализ был проведен с использованием компьютерной программы ANSYS/LS-DYNA.

Выводы. 1. Впервые разработаны и опробованы новые технологии изготовления стволов СО из труднодеформируемых ствольных сталей методами холодного пластического деформирования (две стадии), исключающие недостатки, присущие традиционным способам получения изделий:

- получение длинномерной трубчатой заготовки из короткого полого толстостенного полуфабриката гидропрессованием на подвижной гладкой оправке в среде высоких гидростатических давлений;
- профилирование внутренней полости трубчатой заготовки обжатием ствольной заготовки с профильной подвижной оправкой в гладкой конической матрице и неприводными роликами.

2. На основании проведенного анализа продольной устойчивости составного бруса, состоящего из цилиндрического стержня (оправка), вставленного внутрь цилиндрической трубы (ствольная заготовка), впервые определены критические значения осевой силы (силы проталкивания), длины составного бруса и благоприятные схемы обжатия в конической матрице и неприводными роликами, с точки зрения предотвращения потери осевой (продольной) устойчивости ствольной заготовки вместе с оправкой. Достоверность полученных аналитических зависимостей подтверждена экспериментально.

3. С целью проверки эффективности новых технологий изготовления стволов СО, разработана уникальная методика определения НДС стволов с нарезной внутренней поверхностью различной формы, находящихся под воздействием внутреннего статического и динамического нагружения.

Список литературы. 1. *Туктанов А. Г.* Технология производства стрелково–пушечного и артиллерийского оружия / *А. Г. Туктанов.* – М.: Машиностроение, 2007. – 375 с. **2.** *Розов Ю.Г.* Конечно–элементное моделирование процесса изготовления ствольных заготовок гидроэкструзией в среде высоких гидростатических давлений. «Обработка материалов давлением». Сборник научных трудов. №1 (34) – 2013. С.18–22. (Краматорск, Донбасская государственная машиностроительная академия). **3.** *Розов Ю.Г.* Проектирование оснастки и технологии изготовления ствольных заготовок методом гидроэкструзии на гладкой подвижной оправке. «Обработка материалов давлением». Сборник научных трудов. №2 (35) – 2013. С. 106–109. (Краматорск, Донбасская государственная машиностроительная академия). **4.** *Стеблюк В.І., Орлюк М.В., Розов Ю.Г., Шкарлута Д.Б.,* Напружено-деформований стан заготовки при внутрішньому профілюванні волочінням неприводними роликами. Доповідь X1I Міжнародної науково–практичної конференції «Прогресивна техніка і технологія – 2011», 20–24 червня 2011 р. Київ – Севастополь, Україна. **5.** *Розов Ю.Г.* Конечно-элементная модель волочения трубчатой заготовки на профильной оправке в конической матрице. Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2013. –№ 3. (Магнитогорск, Россия, Магнитогорский государственный технический университет, 2013 г.). **6.** *Розов Ю.Г., Стеблюк В.И., Сидоренко Ю.М., Шкарлута Д.Б.* Оценка влияния профиля канала ствола на прочность СО // Артиллерийское и стрелковое вооружение. Международный научно–технический журнал. – 2012. – №1. – С. 35–39.

Bibliography (transliterated): 1. *Tuktanov A.G.* Tehnologija proizvodstva strelkovo–pushechnogo i artillerijskogo oruzhija A.G.Tuktanov – Moscow: Mashinostroenie, 2007. – 375 P. **2.** *Rozov Ju.G.*

Konechno–jelementnoe modelirovanie processa izgotovlenija stvol'nyh zagotovok gidrojekstruziej v srede vysokih gidrostaticheskih davlenij. «Obrabotka materialov davleniem». Sbornik nauchnyh trudov. No1 (34) – 2013. P.18–22. (Kramatorsk, Donbasskaja gosudarstvennaja mashinostroitel'naja akademyja). **3.** *Rozov Ju.G.* Proektirovanie osnastki i tehnologii izgotovlenija stvol'nih zagotovok metodom gidroекstruzii na gladkoj podvizhnoj opravke. «Obrabotka materialov davleniem». Sbornik nauchnih trudov. No2 (35) – 2013g. P. 106–109. (Kramatorsk, Donbasskaja gosudarstvennaja mashinostroitel'naja akademija). **4.** .*Stebljuk V.I., Orljuk M.V., Rozov Ju.G., Shkarluta D.B.* Napruzheno–deformovanij stan zagotovki pri vnutrish'omu profiljuvanni volochinnjam neprivodymi rolykamy. Dopovid' XII Mizhnarodnoi naukovo–praktychnoi konferencii «Progresivna tehnika i tehnologija – 2011», 20–24 chervnja 2011 – Kiiv – Sevostopol', Ukraina. **5.** *Rozov Ju.G.* Konechno-jelementnaja model' volochenija trubchatoj zagotovki na profil'noj opravke v konicheskoj matrice. Vesnik MGTU im. G.I. Nosova. – 2013. – No3. (Magnitogorsk, Rossija, Magnitogorskij gosudarstvennyj tehnicheskij universitet, 2013). **6.** *Rozov Ju.G., Stebljuk V.I., Sidorenko Ju.M., Shkarluta D.B.* Ocenka vlijanija profilja kanala stvola na prochnost' CO Artillerijskoe i strelkovoe vooruzhenie. Mezhdunarodnyj nauchno–tehnicheskij zhurnal. – 2012. – No1 – P. 35–39.

Поступила (received) 21.10.2014

УДК 621.923

И. А. РЯБЕНКОВ, канд. техн. наук, ГП ХМЗ “ФЭД”, Харьков;
Ф. В. НОВИКОВ, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТРЕНИЯ СВЯЗКИ КРУГА С ОБРАБАТЫВАЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ

В работе получены аналитические зависимости для определения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания на основе раздельного учета энергий “чистого” резания и трения в общем энергетическом балансе процесса шлифования. Установлено, что с течением времени обработки в связи с интенсивным трением в зоне резания и увеличением упругих перемещений в технологической системе сила резания увеличивается. Проведен теоретический анализ отношения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания и показана возможность его увеличения.

Ключевые слова: шлифование, резание, трение, шлифовальный круг, сила резания, упругое перемещение, технологическая система, скорость детали

Введение. При изготовлении высокоточных деталей на финишных операциях традиционно широко используются методы обработки свободным абразивом (доводка, полирование и т.д.). Однако в процессе обработки происходит шаржирование абразивных зерен в обрабатываемый материал (в особенности при обработке цветных металлов), что недопустимо. В связи с этим возникает задача применения более прогрессивных методов обработки, исключающих данное явление. Такими методами следует рассматривать шлифование и в ряде случаев финишную лезвийную обработку. Как известно, основным недостатком шлифования является наличие трения связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом, что приводит к повышению силовой и тепловой напряженности процесса резания, появлению

© И. А. Рябенков, Ф. В. Новиков, 2014

на обрабатываемых поверхностях различных дефектов. Поэтому, чтобы повысить эффективность шлифования, необходимо исключить или уменьшить интенсивность трения в зоне резания, применяя для этого различные технологические методы и приемы. При этом важно также знать технологические возможности процесса шлифования, что требует разработки математической модели баланса энергии резания и трения при шлифовании.

Анализ последних достижений и литературы. В работах [1–3] показано значительное влияние интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом на основные показатели процесса шлифования, что приводит к снижению производительности и качества обработки. Однако эти результаты получены на основе экспериментальных исследований. Теоретические решения в этом направлении фактически отсутствуют. Это ограничивает возможности достаточно полного раскрытия физической сущности процесса шлифования и требует проведения дальнейших исследований.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является обоснование условий повышения эффективности процесса шлифования на основе снижения интенсивности трения в зоне резания. В связи с этим в работе теоретически решается проблема раздельного учета энергий "чистого" резания и трения в общем энергетическом балансе процесса шлифования.

Материалы исследований. Для решения поставленной проблемы следует воспользоваться результатами теоретических исследований процесса шлифования, приведенными в работах [4, 5]. Согласно схемы шлифования прямолинейной детали, движущейся по нормали к рабочей поверхности круга со скоростью $V_{\text{дет}}$ (рис. 1), тангенциальную P_z и радиальную P_y составляющие силы резания можно представить в виде $P_z = P_{z_{рез}} + P_{z_{тр}}$; $P_y = P_{y_{\text{рез}}} + P_{y_{\text{тр}}}$, где $P_{z_{\text{рез}}}$, $P_{y_{\text{рез}}}$ – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, обусловленные процессом "чистого" резания, Н; $P_{z_{тр}}$, $P_{y_{тр}}$ – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, обусловленные процессом трения связки круга с материалом, Н. Составляющие силы резания $P_{z_{\text{рез}}}$ и $P_{y_{\text{рез}}}$ определяются [5]: $P_{z_{\text{рез}}} = \sigma \cdot S_{\text{мгн}} = \sigma \cdot \dfrac{Q}{V_{\text{кр}}} = \sigma \cdot \dfrac{F \cdot V_{\text{дет0}}}{V_{\text{кр}}}$; $P_{y_{\text{рез}}} = \dfrac{P_{z_{\text{р}}}}{K_{\text{рез}}} = \sigma \cdot \dfrac{F \cdot V_{\text{дет0}}}{V_{\text{кр}}} \cdot \text{tg}(\psi + \gamma)$, где σ – условное напряжение резания, Н/м^2; $S_{\text{мгн}} = Q / V_{\text{кр}}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м^2; $Q = F \cdot V_{\text{дет0}}$ – фактическая производительность обработки, м^3/с; F – площадь поперечного сечения обрабатываемого прямолинейного образца, м^2; $V_{\text{дет0}}$ – фактическая линейная скорость съема материала, м/с ($V_{\text{дет0}} \le V_{\text{дет}}$); $V_{\text{кр}}$ – скорость круга, м/с; $K_{\text{рез}} = \text{ctg}(\psi + \gamma)$; ψ –

условный угол трения режущего зерна с обрабатываемым материалом ($\mathrm{tg}\psi = f$ – коэффициент трения); γ – условный (отрицательный) передний угол режущего зерна.

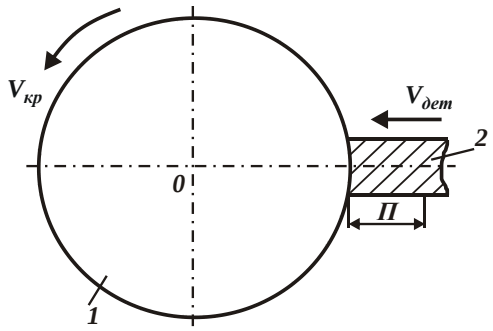


Рис. 1 – Расчетная схема процесса шлифования: 1 – круг; 2 – деталь

Как следует из приведенных зависимостей, составляющие силы резания $P_{z_{рез}}$ и $P_{y_{рез}}$ тем меньше, чем меньше параметры σ, F, $V_{дет0}$ и больше $V_{кр}$.

Составляющие силы резания $P_{z_{тр}}$ и $P_{y_{тр}}$ появляются при наличии трения связки круга с обрабатываемым материалом, когда выполняется условие $V_{дет0} \le V_{дет}$. В этом случае подводимый в зону резания обрабатываемый материал не успевает полностью удаляться режущими зернами и поэтому в технологической системе возникает упругое перемещение y, которое с течением времени обработки τ увеличивается по зависимости: $y = \left(V_{дет} - V_{дет0}\right) \cdot \tau$.

Соответственно величина упругого перемещения y предопределяет возникновение в технологической системе силы $P_{y_{тр}} = c \cdot y = c \cdot \left(V_{дет} - V_{дет0}\right) \cdot \tau$, где – с – жесткость технологической системы, Н/м. Тангенциальная составляющая силы резания $P_{z_{тр}}$ связана с $P_{y_{тр}}$ соотношением $P_{z_{тр}} / P_{y_{тр}} = f_1$, где f_1 – коэффициент трения связки круга с обрабатываемым материалом. Тогда $P_{z_{тр}} = f_1 \cdot c \cdot \left(V_{дет} - V_{дет0}\right) \cdot \tau$.

Как следует из приведенных зависимостей, составляющие силы резания $P_{z_{тр}}$ и $P_{y_{тр}}$ тем меньше, чем меньше параметры f_1, c, $\left(V_{дет} - V_{дет0}\right)$ и $\tau = П / V_{дет}$, где $П$ – величина снимаемого припуска, м (рис. 1). При условии $V_{дет0} = V_{дет}$ составляющие силы резания $P_{z_{тр}}$ и $P_{y_{тр}}$ равны нулю. Поэтому при шлифовании необходимо стремиться выполнять условие $V_{дет0} \to V_{дет}$ за счет поддержания в процессе обработки высокой режущей способности шлифовального круга. Это достигается реализацией режима самозатачивания круга.

При работе круга в режиме затупления скорость $V_{дет0}$ будет уменьшаться, что приведет к нарушению условия $V_{дет0} = V_{дет}$, поскольку $V_{дет0}$ станет меньше $V_{дет}$. Окончательно зависимости для определения P_z, P_y и их отношения опишутся:

$$P_z = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{дет0}}{V_{кр}} + f_1 \cdot c \cdot \left(V_{дет} - V_{дет0}\right) \cdot \tau ; \qquad (9=1)$$

$$P_y = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{дет0}}{V_{кр}} \cdot \mathrm{tg}\left(\psi + \gamma\right) + c \cdot \left(V_{дет} - V_{дет0}\right) \cdot \tau ; \qquad (10=2)$$

$$K_{ш} = \frac{P_z}{P_y} = \frac{\dfrac{\sigma \cdot F \cdot V_{дет0}}{V_{кр}} + f_1 \cdot c \cdot \left(V_{дет} - V_{дет0}\right) \cdot \tau}{\dfrac{\sigma \cdot F \cdot V_{дет0}}{V_{кр}} \cdot \mathrm{tg}\left(\psi + \gamma\right) + c \cdot \left(V_{дет} - V_{дет0}\right) \cdot \tau} . \qquad (11=3)$$

Результаты исследований. При условии $\tau \to 0$, т.е. в начальный момент обработки, зависимость (3) принимает вид: $K_{ш} = K_{рез} = \mathrm{ctg}\left(\psi + \gamma\right)$.

Как следует из рис. 2, с увеличением угла $\left(\psi + \gamma\right) \to 90^0$ коэффициент $K_{ш} \to 0$. С увеличением времени обработки τ вторые слагаемые в числителе и знаменателе зависимости (3) будут увеличиваться и станут больше первых слагаемых слагаемые в числителе и знаменателе зависимости (3). В этом случае зависимость (3) примет вид: $K_{ш} = f_1 = \mathrm{tg}\psi_1 = \mathrm{ctg}\left(90^0 - \psi_1\right)$, где ψ_1 – условный угол трения связки круга с обрабатываемым материалом.

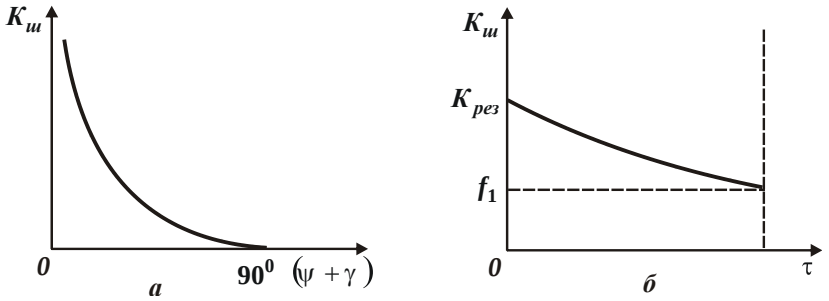


Рис. 2 – Зависимости $K_{ш}$: а – от угла $\left(\psi + \gamma\right)$ и б – времени обработки τ

Сравнивая приведенные зависимости, видно, что в начальный момент обработки при небольшом угле γ угол $\left(90^0 - \psi_1\right)$ будет больше угла $\left(\psi + \gamma\right)$ и поэтому, согласно рис. 2,а, будет выполняться условие $ctg\left(90^0 - \psi_1\right) < ctg\left(\psi + \gamma\right)$. Следовательно, $\mathrm{ctg}\left(\psi + \gamma\right) > f_1$ и характер изменения коэффициента $K_{ш}$ с течением времени τ будет подчиняться зависимости, показанной на рис. 2,б.

Очевидно, при значении $K_ш = f_1$ процесс резания будет фактически отсутствовать, имеет место лишь трение связки круга с обрабатываемым материалом, что приводит к увеличению упругого перемещения y с течением времени обработки τ. Из этого условия можно определить угол $(\psi + \gamma)$, при котором процесс резания переходит в процесс трения связки круга с обрабатываемым материалом: $\operatorname{ctg}(90^0 - \psi_1) = \operatorname{ctg}(\psi + \gamma)$ или $90^\circ - \psi_1 = \psi + \gamma$.

Предельное (максимальное) значение условного (отрицательного) переднего угла режущего зерна γ, при котором происходит переход от процесса резания к процессу трения связки круга с обрабатываемым материалом, равен $\gamma = 90^\circ - \psi_1 - \psi$. Как видно, угол γ тем меньше, чем больше углы ψ_1 и ψ. Например, при ψ_1=20°($\operatorname{tg}\psi_1 = f_1 = 0{,}36$) и ψ=10^0 ($\operatorname{tg}\psi = f = 0{,}18$) предельное отрицательное значение угла γ=60°, т.е. при больших значениях угла $\gamma > 60°$ процесс шлифования практически неосуществим в связи со значительным упругим перемещением, возникающим в технологической системе, и соответственно значительной силой резания, которая будет непрерывно увеличиваться с течением времени обработки τ.

Анализируя зависимость (3), можно сделать вывод, что основным путем увеличения коэффициента $K_ш$ и повышения производительности и качества обработки при шлифовании является выполнение условия $V_{дет0} = V_{дет}$. В этом случае коэффициент $K_ш$ будет принимать наибольшее значение, и процесс шлифования будет протекать с наибольшей эффективностью. Дополнительным условием увеличения $K_ш$ следует рассматривать уменьшение угла $(\psi + \gamma)$ за счет обеспечения высокой режущей способности шлифовального круга.

Выводы. В работе получены аналитические зависимости для определения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания на основе раздельного учета энергий “чистого” резания и трения в общем энергетическом балансе процесса шлифования. Теоретически установлено, что с течением времени обработки в связи с интенсивным трением в зоне резания и увеличением упругих перемещений в технологической системе сила резания увеличивается. Проведен теоретический анализ отношения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания и показана возможность его увеличения с целью повышения эффективности шлифования путем поддержания в процессе высокой режущей способности круга.

Список литературы: **1**. *Маслов Е.Н.* Теория шлифования металлов / *Е.Н. Маслов*. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. **2.** *Якимов А.В*. Оптимизация процесса шлифования / *А.В. Якимов*. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. **3**. *Лурье Г.Б.* Шлифование металлов / *Г.Б. Лурье*. – М.: Машиностроение, 1969. – 197 с. **4**. *Якимов О.В*. Високопродуктивне шліфування: навчальний

посібник / *О.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков* та ін. – К.: ІСДО, 1995. – 180 с. **5.** *Новіков Ф.В.* Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / *Ф.В. Новіков, І.О. Рябенков*. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Maslov E.N*. Teoriya shlifovaniya metallov / *E.N. Maslov*. – Moscow: Mashinostroenie, 1974. – 319 p. **2.** *Yakimov A.B*. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya / *A.V. Yakimov*. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 175 p. **3**. *Lure G.B.* Shlifovanie metallov / *G.B. Lure*. – Moscow: Mashinostroenie, 1969. – 197 p. **4**. *Yakimov O.V*. Vysokoproduktyvne shlifuvannya: navchalnyi posibnyk / *O.V. Yakimov, F.V. Novikov, G.V. Novikov* ta in. – Kharkiv: ISDO, 1995. – 180 p. **5**. *Novikov F.V.* Teoretychni osnovy mekhanichnoi obrobky vysokotochnykh detalei: monografiya / *F.V. Novikov, I.O. Ryabenkov*. – Kharkiv: Vyd. KNEU – 2013. – 352 p.

Поступила (received) 23.10.2014р.

УДК 621.777.4

С. Ф. САБОЛ, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ», Київ

ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ШТАМПУ ДЛЯ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ВИРОБІВ ЗІ СТУПІНЧАСТОЮ ПОРОЖНИНОЮ З РОЗТЯГНЕННЯМ СТІНКИ ЗАГОТОВКИ

Приведено схему конструкції штампу для холодного видавлювання порожнистих вісесиметричних виробів зі ступінчастою порожниною з розтягненням стінки заготовки. На основі використання закону збереження обєму, здійснено розрахунки конструктивних розмірів штампу:розміри верхньої та нижньої порожнини контейнера, розміри регулювального кільця, використання якого дає змогу змінювати швидкість переміщення контейнера у відповідності до зміни швидкості металлу стінки заготовки, в процесі деформування, що забезпечує постійне зщеплення каналу контейнера з буртом стінки заготовки що видавлюється .

Ключові слова: холодне видавлювання, вісесиметричні вироби, ступінчаста циліндрична порожнина, розтягнення, штамп для видавлювання.

Вступ. Використання високопродуктивних процесів холодного видавлювання порожнин дозволяє суттєво зменшити витрати металів при забезпеченні точності, високих механічних властивостей та експлуатаційних характеристик виробів. Але високі питомі зусилля, які виникають при реалізації вказаних процесів, обмежують використання холодного видавлювання, зумовлюючи низьку стійкість інструменту. Одним із шляхів зменшення зусилля холодного видавлювання є зміна схеми напруженого стану процесу: з схеми всебічного нерівномірного стиску – на стискувально-розтягувальну, що забезпечують процеси видавлювання з роздачею та з розтягненням стінки заготовки.

Холодне видавлювання з розтягненням стінки заготовки дозволяє, в порівнянні з іншими способами формоутворення порожнистих виробів, досягати найбільшого зниження питомих зусиль на деформуючому

© С. Ф. Сабол, 2014

інструменті. Існуючі конструкції штампів [1] для реалізації вказаних процесів передбачають використання додаткових приводів, що значно підвищує їх громіздкість та вартість.

Метою статті є визначення конструктивних параметрів штампів, що дають змогу реалізувати холодне видавлювання виробів зі ступінчастою порожниною з розтягненням стінки заготовки без використання додаткових приводів.

На кафедрі МПМ та РП розроблено конструкції штампів які дають змогу реалізувати процес холодного видавлювання вісесиметричних деталей з розтягненням стінки заготовки в яких розтягувальне напруження створюється за допомогою рідини високого тиску. Такі штампи не потребують використання складного ковальсько-штампувального обладнання подвійної або потрійної дії.

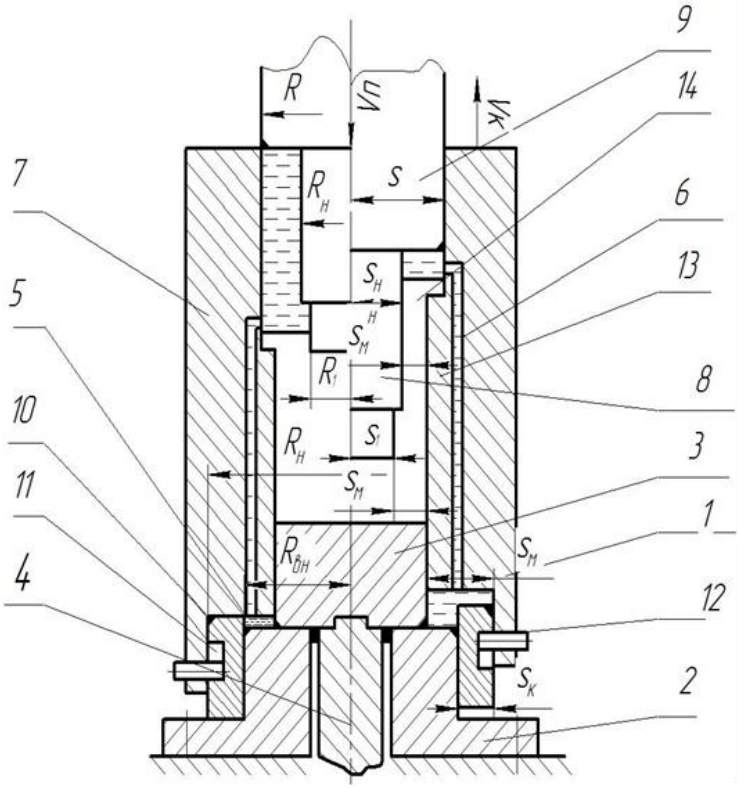


Рис. 1 – Конструкція штампу для видавлювання порожнистих виробів зі ступінчастою порожниною

На рис. 1 зображено конструкцію штампу для видавлювання порожнистих виробів зі ступінчастою порожниною, (ліворуч – від вісі симетрії показаний вихідний стан перед видавлюванням, праворуч – в процесі видавлювання). Принцип дії та конструкція приведеного штампу аналогічна конструкції штампу для видавлювання порожнини постійного діаметру, яка детально описана в роботі [4]. Особливість коностркції штампу для

видавлювання ступінчастих порожнин полягає в тому, що швидкість течії здеформованого металу в стінці виробу при видавлюванні порожнин різних діаметрів різна – для порожнини більшого діаметру вона більша, в результаті чого, виникає необхідність регулювання швидкості переміщення матриці, яка повинна дорівнювати швидкості течії металу. Для виконання цієї функції передбачено регулювалюне кільце 10, встановлене на опорі 2. При видавлюванні порожнини першої ступені

Розрахунок виконавчих розмірів верхньої та нижньої порожнини контейнера- матриці проводиться аналогічно [4]. В результаті отримуємо для верхньої порожнини:

$$R_в = R = R_з + 0,78 \cdot (R_з - R_п)$$

де $R_з$ – радіус заготовки, $R_п$ - радіус пуансона першої ступені.

Радиус нижньої порожнини дорівнює

$$R_н^2 = R_з^2 \cdot \left(\frac{R^2 - R_п^2}{R_п^2} + 1 \right)$$

Розтягувальне зусилля прикладене в процесі деформування до стінки деталі визначається як

$$P = q \cdot \pi \left(\left(R_н^2 - Rз^2 \right) - \left(R_б^2 - R_п^2 \right) \right)$$

Розміри регулювального кільця знаходяться з наступних міркувань.

Швидкості переміщення матриці при формозміні порожнин двох ступенів знаходимо з рівняння рівності витрат, які в випадку видавлювання першої ступені порожнини мають наступний вигляд:

$$\upsilon_п \cdot S_п + \upsilon_м \cdot S_м^1 = \upsilon_к \cdot S_н$$

$$\upsilon_п \cdot S_I = S_M^I \cdot \upsilon_M^I,$$

де $\upsilon_п$ - швидкість ступінчастого пуансона;

υ_K^I – швидкість руху матриці-контейнера;

υ_M^I – швидкість течії металу;

S – площа поперечного перерізу плунжера;

S_I – площа поперечного перерізу першої ступені пуансона

S_M^I – кільцева площа поперечного перерізу металу що витісняється з першої порожнини;

S_H – площа нижньої камери контейнера.

Умова постійного зачеплення бурта заготовки з матрицею:

$$\upsilon_M^I = \upsilon_K^I$$

Вирішуючи систему отриманих рівнянь відносно площі S_H,

$$\upsilon_n \cdot S + \upsilon_M \cdot S_M^I = \upsilon_K \cdot S_H,$$
$$\upsilon_n \cdot S_I = S_M^I \cdot \upsilon^I,$$
$$\upsilon_M^I = \upsilon_K^I$$

отримуємо

$$S_M = S_M^I (\frac{S}{S_I} + 1).$$

Виражаючи площі через радіуси, отримуємо

$$R_H^2 = (R_u^2 - R_1^2)(1 + \frac{R^2}{R_1^2}),$$

де R_H - радіус нижньої камери,

R_u – радіус виробу

R_I – радіус першої ступені пуансона

R – радіус плунжера.

Аналогічні рівняння складають для випадку видавлювання другої ступені:

$$\upsilon_n \cdot S + \upsilon_M^{II} \cdot S_M^{II} = \upsilon_K^{II} (S_M - S_K);$$
$$\upsilon_n \cdot S_M^{II} = \upsilon_M^{II} \cdot S_M^{(II)},$$

де υ_M^{II} - швидкість течії металу при формозміні другої ступені порожнини;

S_M^{II} – площа металу що витискується при видавлювання другої порожнини;

υ_K^{II} – швидкість матриці-контейнера при видавлюванні другої порожнини;

S_K – площа поперечного перерізу регулювального кільця.

Використовуючи умову $\upsilon_K^{II} = \upsilon_M^{II}$, вирішуємо систему рівнянь відносно S_K.

$$S_K = \pi(R_3^2 - R_{вн}^2),$$

де $R_{вн}$ – внутрішній радіус втулки;

R_3 – зовнішній радіус втулки;

знаходимо

$$R_{вн}^2 = (1 + \frac{R^2}{R_{II}^2})(R_u^2 - R_{II}^2),$$

де R_{II} – радіус другої ступені пуансона;

Таким чином, розміри втулки дорівнюють:

$$R_з = \sqrt{(R_u^2 - R_I^2)(1 + \frac{R^2}{R_I^2})},$$
$$R_{вн} = \sqrt{(1 + \frac{R^2}{R_{II}^2})(R_u^2 - R_{II}^2)}.$$

Висновки: отримано аналітичні залежності для визначення конструктивних розмірів штампового оснащення для видавлювання виробів з порожниною постійного діаметра та ступінчатою порожниною.

Список літератури: **1.** *Кудо Х.* Холодное выдавливание с растяжением / Х. Кудо, М. Чинодзаки // Экспресс-информ., Технология и оборудование кузнечно-штамповочного производства. – 1973. – № 42. – С. 18–30. **2** *Башта Т. М.* Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов. / Т. М. Башта, С. С. Руднев, В. В. Некрасов и др. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с. **3.** А.с. №1357111 СССР, МКИ В 21 J 13/02. Устройство для штамповки деталей / Ю. Ф. Черный, В.Л. Калюжный, С.Ф. Сабол, А.В. Бондаренко (СССР). – № 4018087/25-27 Заявник та опубл. в бюл. №45, 1987. **4.** *Калюжний В.Л.* Розробка конструкції та розрахунок конструктивних параметрів штампу для холодного видавлювання сталевих порожнистих виробів / В.Л. Калюжний, О.В.Калюжний, С.Ф.Сабол, В.В.Піманов // Обработка материалов давленим. Сборник научных трудов Краматорск: ДГМА. – № 2(21) 2009.- С. 382-387.

Biblipgraphy (transliterated) 1. Kudo H. Holodnoe vydavlivanie s rastyazheniem X. Kudo, Moscow. Chinodzaki Ekspress-inform., Texnologiya i oborudovanie kuznechno-shtampovochnogo proizvodstva. – 1973. – No 42. – p. 18–30. 2. Bashta T. M. Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody: uchebnik dlya mashinostroitelnyx vuzov. T. M. Bashta, S. S. Rudnev, V. V. Nekrasov i dr. – 2-e izd., pererab. – Moscow: Mashinostroenie, 1982. – 423 p. 3. Pat. No1357111 URS, Mki v 21 j 1302. Ustrojstvo dlya shtampovki detalej U. F. Chernyj, V.L. Kalyuzhnyj, S.F. Sabol, (URS) – No 401808725–27 zayavnik ta opubl. v byul. No45, 1987. 4. Kalyuzhnij V.L. Rozrobka konstrukcii ta rozraxunok konstruktivnix parametriv shtampu dlya xolodnogo vidavlyuvannya stalevix porozhnistix virobiv V.L. Kalyuzhnij, O.V.Kalyuzhnij, S.F.Sabol, V.V.Pimanov Obrabotka materialov davlenim. sbornik nauchnyx trudov Kramatorsk: DGMA. – No 2(21) 2009.- p. 382–387.

Надійшла (recieved) 03.11.2014

УДК 621.762.4

Д. В. САВЕЛОВ, канд. техн. наук, доц., КрНУ им. М. Остроградского, Кременчуг

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ВИБРОСТОЛ – МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ПОРОШОК – ПУАНСОН» ПРИ ДВУСТОРОННЕМ ВИБРАЦИОННОМ ПРЕССОВАНИИ

Представлена математическая модель динамической системы «вибростол – металлический порошок – пуансон», в которой металлический порошок представлен в виде системы с распределенными параметрами. Получены теоретические выражения, описывающие поведение динамической системы в рабочем режиме: закономерности движения и амплитуды колебаний вибростола и пуансона, которые учитывают направления и соотношения амплитуд возмущающих сил и угловые частоты вынужденных колебаний.

Ключевые слова: математическая модель, динамическая система, металлический порошок, вибростол, пуансон, амплитуда возмущающей силы.

Введение. При производстве изделий из металлических порошков тугоплавких металлов используют различные вибрационные методы.

© Д. В. Савелов, 2014

Анализ последних исследований и литературы. При изучении и анализе существующих литературных источников [1, 2] было установлено, что одним из наиболее эффективных способов вибрационного формования габаритных изделий из металлических порошков, является их одновременное двухстороннее вибрационное прессование. Поэтому, с целью снижения времени прессования, повышения равноплотности получаемого изделия и эффективности самого процесса прессования на базе существующих аналогов [1] была разработана новая конструкция вибропресса, который сочетает в себе относительную простоту и низкую энергоемкость, высокую эффективность и надежность в работе [3]. Однако в рассмотренной литературе отсутствуют научно обоснованные методы расчета таких вибропрессов, что не позволяет подобрать режимы вибрационного воздействия, а именно выбрать соотношение между амплитудами возмущающих сил и угловыми частотами вынужденных колебаний, действующими на пуансон с учетом физико-механических характеристик самих металлических порошков.

Цель исследований и постановка проблемы. Целью исследования является создание аналитического описания динамического поведения системы «вибростол – металлический порошок – пуансон», что позволит определить рабочие параметры вибропресса, выполнить анализ и подобрать режимы вибрационного прессования при одновременном нагружении металлического порошка двумя источниками вертикальных колебаний.

Материал исследований. Предложенный вибропресс отличается от существующих аналогов [1] тем, что он снабжен двумя источниками вертикальных колебаний − вибровозбудителями, один из которых расположен под вибростолом, а второй − на пуансоне и расположены они симметрично относительно теоретической оси вибропресса [3]. Эти вибровозбудители при работе одновременно сообщают пуансону и вибростолу направленные друг навстречу другу вертикальные колебания, в результате чего металлический порошок в пресс-форме одновременно подвергается вибрационному воздействию сверху и снизу. Это способствует более интенсивному преодолению сил трения между металлическими частицами порошка и наиболее равноплотной укладке по всей высоте прессовки.

Для изучения динамических процессов, происходящих при двустороннем вибрационном прессовании порошка, рассмотрим динамическую систему «вибростол – металлический порошок – пуансон», в которой металлический порошок представлен в виде системы с распределенными параметрами (рис. 1).

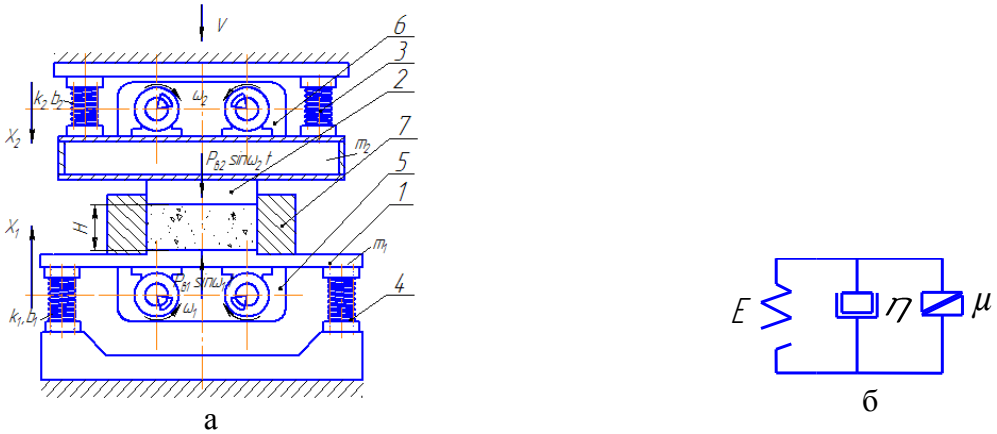


Рис. 1– Расчетная схема: а – гибридной динамической системы «вибростол – металлический порошок – пуансон» и б – реологическая модель слоя металлического порошка:

На порошок в пресс-форме 7 оказывается вибрационное воздействие двумя источниками вертикальных колебаний. Снизу – от вибростола 1 массой m_1, который установлен на станине вибропресса при помощи упругих амортизаторов 4 с коэффициентами жесткости k_1 и демпфирования b_1. На вибростол 1 действует возмущение от вибровозбудителя 5 в виде гармонической силы $P_{в1}\sin\omega_1 t$. Сверху – от пуансона 2, подвешенного на упругих амортизаторах 3, с коэффициентами жесткости k_2 и демпфирования b_2. На пуансон 2 массой m_2 действует возмущение от вибровозбудителя направленных колебаний 6 в виде гармонической силы $P_{в2}\sin\omega_2 t$. В результате этого вибростол 1 вместе с пресс-формой 7 и пуансон 2 совершают вертикальные колебания, направленные навстречу друг другу, и подвергают вибрационному воздействию порошок в пресс-форме 7. Одновременно с этим через пуансон 2 на порошок оказывается статическое пригружение.

Для описания математической модели будем использовать метод, согласно которому прессуемый металлический порошок учитывается в уравнениях движения рабочих органов вибропресса посредством реакции среды [4]. Волновое уравнение принимается в виде [5]:

$$E\cdot(1+\mu)\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}+\eta\frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial x^2\partial t}+E\cdot\tilde{\delta}\cdot(1+\mu)\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}+\eta\cdot\tilde{\delta}\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x\partial t}-\rho\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}=0, \qquad (1)$$

решение которого отыскивалось при следующих граничных условиях:

при $x=0$:

$$-m_1\frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2}-b_1\frac{\partial u(0,t)}{\partial t}-k_1u(0,t)+F\cdot E\cdot(1+\mu)\frac{\partial u(0,t)}{\partial x}+\eta\cdot F\frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial x\partial t}=-P_{1в}\sin(\omega_1\cdot t), \qquad (2)$$

при $x=H$:

$$-m_2\frac{\partial^2 u(H,t)}{\partial t^2}-b_2\frac{\partial u(H,t)}{\partial t}-k_2u(H,t)+F\cdot E\cdot(1+\mu)\frac{\partial u(H,t)}{\partial x}+\eta\cdot F\frac{\partial^2 u(H,t)}{\partial x\partial t}=-P_{2в}\sin(\omega_2\cdot t) \qquad (3)$$

и было найдено в виде:

$$u_1(x_1,t)=\frac{P_{в1}\cdot e^{-0,5\cdot\tilde{\delta}\cdot x_1}}{\left(Z_e^2+Z_i^2\right)}\cdot\left(R_{e1}\cdot\sin\omega_1 t+R_{i1}\cdot\cos\omega_1 t\right); \quad (4)$$

$$u_2(x_2,t)=\frac{P_{в2}\cdot e^{-0,5\cdot\tilde{\delta}\cdot x_2}}{\left(X_e^2+X_i^2\right)}\cdot\left(R_{e2}\cdot\sin\omega_2 t+R_{i2}\cdot\cos\omega_2 t\right), \quad (5)$$

где ω_1 и ω_2 – угловые частоты вынужденных колебаний; R_{e1}, R_{i1}, R_{e2} и R_{i2} – определятся из выражений:

$$R_{e1}=Z_e\cdot\left(V\cdot\cos\beta_1 x_1-M\cdot\sin\beta_1 x_1\right)+Z_i\cdot\left(W\cdot\cos\beta_1 x_1-N\cdot\sin\beta_1 x_1\right); \quad (6)$$

$$R_{i1}=Z_e\cdot\left(W\cdot\cos\beta_1 x_1-N\cdot\sin\beta_1 x_1\right)-Z_i\cdot\left(V\cdot\cos\beta_1 x_1+M\cdot\sin\beta_1 x_1\right); \quad (7)$$

$$R_{e2}=\left(X_e+X\right)_i\cdot\left(-z_2\cdot\cos\beta_2 x_2-z_1\cdot\sin\beta_2 x_2\right);\ R_{i2}=\left(X_e+X\right)_i\cdot\left(z_2\cdot\sin\beta_2 x_2\right) \quad (8)$$

$$Z_e=z_1\cdot V-z_2\cdot W+z_3\cdot M;\qquad Z_i=z_1\cdot W+z_2\cdot V+z_3\cdot N; \quad (9)$$

$$X_e=z_2\cdot D-z_3\cdot L-z_1\cdot C;\quad X_i=\left(z_1\cdot D+z_2\cdot C+z_3\cdot K\right)\cdot e^{-0,5\cdot\delta\cdot H}. \quad (10)$$

$$z_1=k_1+0,5\cdot\tilde{\delta}\cdot E\cdot F\cdot(1+\mu)-m_1\cdot\omega_1^2;\ z_2=\omega_1\cdot\left(b_1+0,5\cdot\tilde{\delta}\cdot\eta\cdot F\right);\ z_3=F\cdot\beta_1\cdot\left[E\cdot(1+\mu)-\eta\right]; \quad (11)$$

$$M=\left[k_2-0,25\cdot\tilde{\delta}^2\cdot E\cdot F\cdot(1+\mu)-m_1\cdot\omega_1^2\right]\cdot\cos(\beta_1\cdot H)+\left[0,5\cdot\tilde{\delta}\cdot\beta_1\cdot E\cdot F\cdot(1+\mu)\right]\cdot\sin(\beta_1\cdot H); \quad (12)$$

$$N=\left[\omega_1\cdot\left(b_2-0,25\cdot\tilde{\delta}^2\cdot\eta\cdot F\right)\right]\cdot\cos(\beta_1\cdot H)+\left[0,25\cdot\tilde{\delta}^2\cdot\beta_1\cdot\eta\cdot F\cdot\omega_1\right]\cdot\sin(\beta_1\cdot H); \quad (13)$$

$$V=\left[k_2+0,5\cdot\tilde{\delta}\cdot E\cdot F\cdot(1+\mu)-m_2\cdot\omega_1^2\right]\cdot\sin(\beta_1\cdot H)+\left[\beta_1\cdot E\cdot F\cdot(1+\mu)\right]\cdot\cos(\beta_1\cdot H); \quad (14)$$

$$W=\left[\omega_1\cdot\left(b_2+0,5\cdot\tilde{\delta}\cdot\eta\cdot F\right)\right]\cdot\sin(\beta_1\cdot H)-\left[\beta_1\cdot\eta\cdot F\cdot\omega_1\right]\cdot\cos(\beta_1\cdot H); \quad (15)$$

$$\beta_1=0,5\cdot\sqrt{\left(\rho\cdot{\omega_1}^2/E_k\right)-1,25\cdot\tilde{\delta}^2};\quad \beta_2=0,5\cdot\sqrt{\left(\rho\cdot{\omega_2}^2/E_k\right)-1,25\cdot\tilde{\delta}^2}. \quad (16)$$

При $x_1=x_2=0$ выражения (4) и (5) описывают соответственно закономерности движения вибростола и пуансона.

После преобразований выражения (89) и (90) примут следующий вид:

$$u_1(x_1,t)=A_1\cdot\left(\sin\omega_1 t-\varphi_1\right)\cdot e^{-0,5\cdot\tilde{\delta}\cdot x_1};\ u_2(x_2,t)=A_2\cdot\left(\sin\omega_2 t-\varphi_2\right)\cdot e^{-0,5\cdot\tilde{\delta}\cdot x_2}, \quad (17)$$

где A_1 и A_2 – амплитуды колебаний соответственно вибростола и пуансона вибропресса; φ_1 и φ_2 – углы сдвига фаз.

Значения амплитуд колебаний A_1 и A_2 и углов сдвига фаз φ_1 и φ_2 определятся из зависимостей:

$$A_1=P_{в1}\cdot\frac{\sqrt{{R_{e1}}^2+{R_{i1}}^2}}{Z_e^2+Z_i^2};\ A_2=P_{в2}\cdot\frac{\sqrt{{R_{e2}}^2+{R_{i2}}^2}}{X_e^2+X_i^2}; \quad (18)$$

$$\varphi_1=\operatorname{arctg}\left(R_{i1}/R_{e1}\right);\ \varphi_2=\operatorname{arctg}\left(R_{i2}/R_{e2}\right). \quad (19)$$

Результаты исследований. Из полученных выражений видно, что закономерности движения вибростола, пуансона и возникающие в прессуемом слое напряжения, а значит и эффективность уплотнения во многом

определяются соотношением угловых частот вынужденных колебаний: вибростола ω_1 и пуансона ω_2. На рис. 2 показано изменение амплитуд колебаний вибростола A_1 и пуансона A_2 в зависимости от коэффициента объемного уплотнения порошка ε, высоты изделия H при различном соотношении угловых частот вынужденных колебаний: $\omega_1 = \omega_2 = 1465$ рад/с; $\omega_2 = 0,75 \cdot \omega_1 = 1098$ рад/с; $\omega_2 = 0,5 \cdot \omega_1 = 732$ рад/с; $\omega_1 = 0,75 \cdot \omega_2 = 1098$ рад/с; $\omega_1 = 0,5 \cdot \omega_2 = 732$ рад/с при $\omega_2 = 1465$ рад/с.

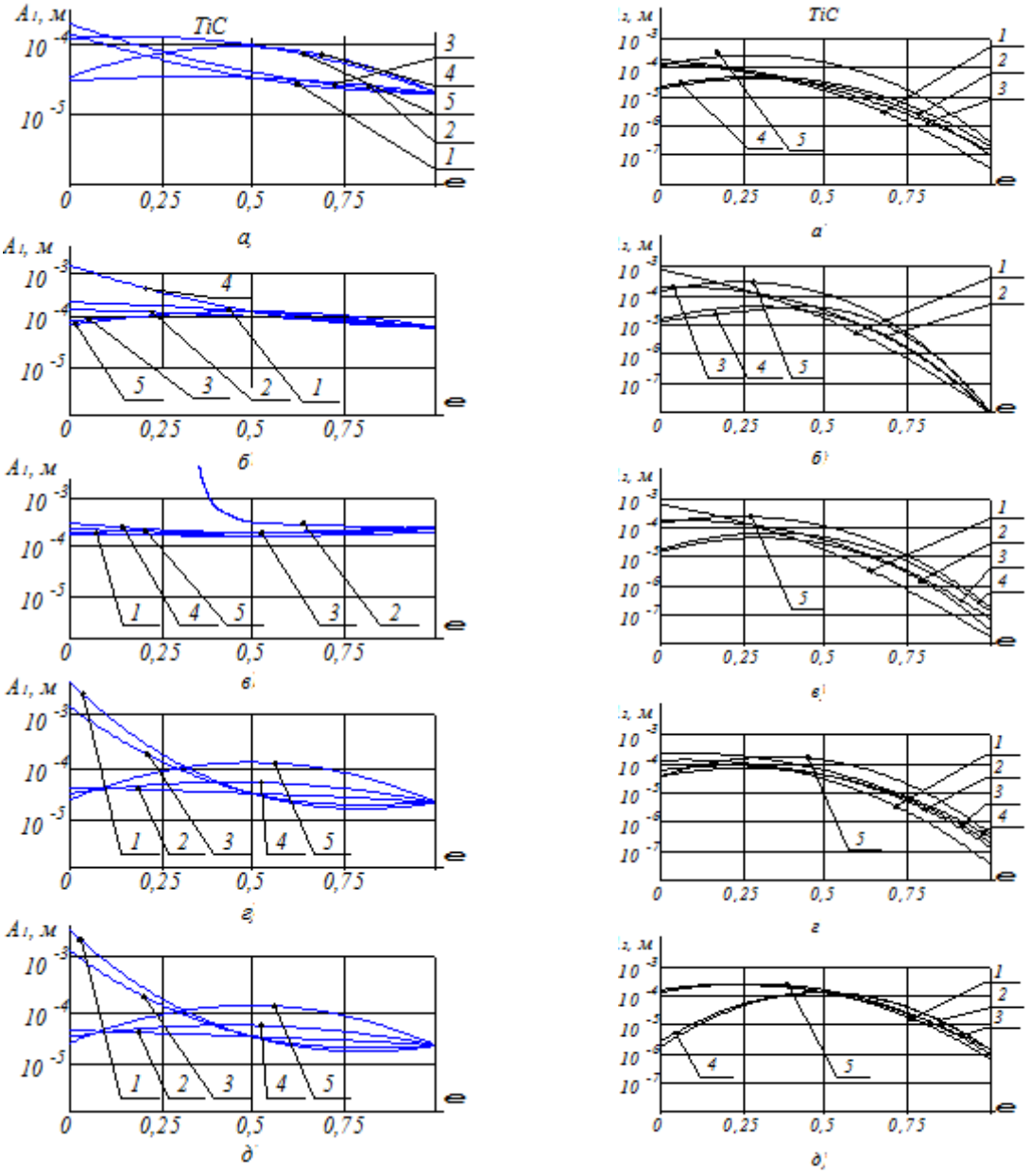


Рис. 2 – Изменения амплитуд колебаний вибростола A_1 и пуансона A_2 в зависимости от коэффициента объемного уплотнения порошка ε: 1 – при $H = 0,1$ м; 2 – при $H = 0,2$ м; 3 – при $H = 0,3$ м; 4 – при $H = 0,4$ м; 5 – при $H = 0,5$ м

Теоретические результаты получены при амплитудах возмущающих сил $P_{в1} = P_{в2} = 10000$ Н, масса вибростола вместе с пресс-формой и вибровозбудителями $m_1 = 47$ кг, масса пуансона вместе с виброплитой и вибровозбудителями $m_2 = 71$ кг, суммарная жесткость упругих опор вибростола суммарная жесткость упругих амортизаторов в подвеске виброплиты $k_1 = k_5 = 235440$ Н/м.

Из графиков видно, что наиболее рациональным для вибрационного пресса с двумя источниками вертикальных колебаний является режим, в котором обеспечивается равенство амплитуд возмущающих сил $P_{в1}$ и $P_{в2}$ и угловых частот вынужденных колебаний ω_1 и ω_2. В этом случае движение элементов рассматриваемой динамической системы носит достаточно стабильный симметричный характер, а амплитуды вынужденных колебаний вибростола A_1 и вибропуансона A_2 имеют один порядок при различной толщине прессуемого слоя (рис. 2, а). Именно при таких условиях обеспечивается эффективное прессование малопластичных металлических порошков и формование из них готовых изделий.

Выводы. В работе сделана попытка создания математической модели динамической системы «вибростол – металлический порошок – пуансон». Предложенный подход позволил получить теоретические закономерности движения и амплитуды колебаний вибростола и пуансона в контакте с прессуемым порошком в зависимости от конструктивных особенностей динамической системы, направления, вида и соотношения амплитуд возмущающих сил $P_{в1}$ и $P_{в2}$ и угловых частот вынужденных колебаний ω_1 и ω_2. Наиболее приемлемым для практической реализации в вибропрессах является режим, в котором обеспечивается равенство амплитуд возмущающих сил $P_{в1}$ и $P_{в2}$ и угловых частот вынужденных колебаний ω_1 и ω_2.

Список литературы: **1.** Порошковая металлургия / *С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон*. – Москва: Металлургия – 1980. – 496 с. **2.** *Осокин Е.Н.* Процессы порошковой металлургии. Версия 1.0 [Электронный ресурс] : курс лекций / *Е.Н. Осокин, О.А. Артемьева*. – Электрон. дан. (5 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Процессы порошковой металлургии: УМКД № 63–2007 / рук. творч. коллектива *Е.Н. Осокин*). – 1 электрон. опт. диск (*DVD*). – Систем. требования: *Intel Pentium* (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц; 512 Мб оперативной памяти; 5 Мб свободного дискового пространства ; привод *DVD*; операционная система *Microsoft Windows* 2000 *SP* 4 / *XP SP* 2 / *Vista* (32 бит) ; *Adobe Reader* 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов формата *pdf*). **3.** Пат. 76280 Україна, МПК B28B1/08. Вібропрес для формування виробів з металевих порошків / *Савєлов Д.В., Драгобецький В.В., Хабло Г.П., Чебенко Ю.М.*; заявник і патентовласник КрНУ імені Михайла Остроградського, заявл.02.07.2012; опубл. 25.12.12, Бюл. № 24. **4.** *Чубук Ю.Ф.* Вибрационные машины для уплотнения бетонных смесей / *Ю.Ф. Чубук, И.И. Назаренко, В. Н. Гарнец.* – К.: Выща шк., 1985. – 168 с. **5.** *Savelov D.V.* The theoretical study of process of metal powder compression at vibration exciter with «hard» matrix and with simultaneous static tightness /

D.V. Savelov, V.V. Dragobetsky, A.D. Konovalenko. Proceedings of the 3rd International Academic Conference «Applied and Fundamental Studies», 2013, C. 90–96.

Bibliography (transliterated): 1. Poroshkovaya metallurgiya P. P. Kiparisov, G.A. Libenson. – Moskva: Metallurgiya, – 1980. – 496 p. **2.** Osokin E.N. Processih poroshkovoyj metallurgii. Versiya 1.0 [Ehlektronnihyj resurs]: kurs lekciyj E.N. Osokin, O.A. Artemjeva. – Ehlektron. dan. (5 Mb). – Krasnoyarsk: IPK SFU, 2008. – (Processih poroshkovoyj metallurgii: UMKD No 63–2007 ruk. tvorch. kollektiva E.N. Osokin). – 1 ehlektron. opt. disk (DVD). – Sistem. trebovaniya: Intel Pentium (ili analogichnihyj processor drugikh proizvoditeleyj) 1 Gb,; 512 Mb operativnoyj pamyati; 5 Mb svobodnogo diskovogo prostranstva ; privod DVD ; operacionnaya sistema Microsoft Windows 2000 SP 4 XP SP 2 Vista (32 bit); Adobe Reader 7.0 (ili analogichnihyj produkt dlya chteniya fayjlov formata pdf). **3.** Pat. 76280 Ukraïna, MPK V28V108. Vibropres dlya formuvannya virobiv z metalevikh poroshkiv Savєlov D.V., Dragobecjkiyj V.V., Khablo G.P., Chebenko Yu.M.; zayavnik i patentovlasnik KrNU imeni Mikhayjla Ostrogradsjkogo, zayavl.02.07.2012; opubl. 25.12.12, Byul. No 24. **4.** Chubuk Yu.F. Vibracionnihe mashinih dlya uplotneniya betonnihkh smeseyj Yu.F. Chubuk, I.I. Nazarenko, V. N. Garnec. – Kiev: Vihtha shk., 1985. – 168 P. **5.** Savelov D.V. The theoretical study of process of metal powder compression at vibration exciter with «hard» matrix and with simultaneous static tightness D.V. Savelov, V.V. Dragobetsky, A.D. Konovalenko. Proceedings of the 3rd International Academic Conference «Applied and Fundamental Studies», 2013, P. 90–96.

Поступила (received) 28.10.2014

УДК 621.777.01

Б. П. СЕРЕДА, докт. техн. наук, проф., ЗГИА;
Ю. А. БЕЛОКОНЬ, канд. техн. наук, доц., ЗГИА;
Е. В. БАБАЧЕНКО, аспирант, ЗГИА, Запорожье

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СПЛАВОВ ПРИ СВС-ПРЕССОВАНИИ

В работе рассмотрены вопросы, связанные непосредственно с получением интерметаллидных сплавов в режиме теплового взрыва, включая важный вопрос перехода от самовоспламенения к уплотнения синтезированного продукта и получения конечного продукта. В экспериментах по определению зависимости общей пористости образцов из γ-TiAl сплава от времени выдержки под давлением варьировали как марки порошка титана, в значительной мере определяющие температуру пористой заготовки после прохождения по ней волны горения. Кристаллизация продукта начинается сначала в тех областях расплава, которые обогащены более тугоплавким компонентом. В зоне догорания происходит донасыщение твердого продукта алюминием . Установлено, что изменение пористости интерметаллидных сплавов при СВС-прессовании в значительной степени зависят от температуры начала прессования, определяемой температурой синтеза состава и времени выдержки при давлении.

Ключевые слова: синтез, интерметаллиды, СВС-прессования, уплотнение, пористость

Введение. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) является эффективным методом получения широкого класса материалов и представляет собой сильно экзотермическое взаимодействие химических

© Б. П. Середа, Ю. А. Белоконь, Е. В. Бабаченко, 2014

реагентов в конденсированной фазе, протекающее в режиме горения [1]. Одним из вариантов проведения СВС-процесса является нагрев с заданной скоростью до таком высокой температуры, при которой начинается объемный саморазогрев системы за счет химической реакции, и СВС проходит в режиме объемного теплового взрыва. Этим способом синтезировано наибольшее число материалов, в первую очередь, это интерметаллиды (в основном алюминиды металлов) и композиты на их основе [2]. Однако с учетом значительного отличия нового метода от традиционного способа горячего прессования и сложности составов материалов большой интерес представляет исследование процесса образования компактного материала из высокопористых продуктов горения.

Цель работы – изучить процесс уплотнения продуктов синтеза на примере простых модельных интерметаллидных сплавах.

Материалы исследования. В качестве объектов исследования были выбраны системы Ti-Al и Ni-Al. Шихты готовили из порошков титана, никеля и алюминия дисперсностью 100-250 мкм. Порошкообразные компоненты смешивали в стальных шаровых мельницах в воздушной среде. Шихту просушивали в шкафу типа ШСВА-2,4 и на ручном гидравлическом прессе формовали в заготовки диаметром 50-70 мм и высотой 20-30 мм. Параметры горения шихтовых составов определяли по известной методике [3]. СВС-прессование осуществляли на прессе ПСУ-125 в закрытых стальных пресс-формах с теплоизолятором. Пресс был снабжен блоком автоматического управления, позволяющим задавать временные параметры синтеза (задержки прессования, выдержки под давлением и другие) с точностью до 0,1 с. Синтезированные материалы анализировали на содержание основных компонентов и примесей методами химического и рентгенофазового анализов. Общую пористость за время достижения необходимого давления (плотность укладки) определяли экспериментально, по методу «керосиновой» пробы, заключающемуся в сочетании гидростатического взвешивания и пропитки образца в вакууме жидкостью, которая хорошо смачивала исследуемый материал и плохо растворялась в воде (керосином).

Результаты исследования. Экспериментальные данные по изменению общей пористости $П_{общ}$ интерметаллида TiAl в процессе прессования приведены на рис. 1. Время опыта $\tau_{оп}$ представляет собой сумму значений времени достижения давления $\tau_н$ = const = 1±0,1 с и времени выдержки под давлением $\tau_в$. Образец, не подвергавшийся прессованию, имел общую пористость 49,3 %, что свидетельствует о некотором самоуплотнении γ-TiAl в процессе синтеза, по-видимому, под действием сил поверхностного натяжения

[4], так как теоретически рассчитанное значение $П_{общ}$ после завершения СВС составляет 56,6 %.

Основное отличие полученной зависимости от традиционных кривых горячего прессования состоит в появлении на ней горизонтального участка при $1с < \tau_{оп} < 2с$. Как видно из приведенных данных, кривую уплотнения продуктов горения системы Ti–Al в зависимости от скорости уплотнения материала можно условно разбить на четыре участка. Это говорит о сложном характере процесса уплотнения.

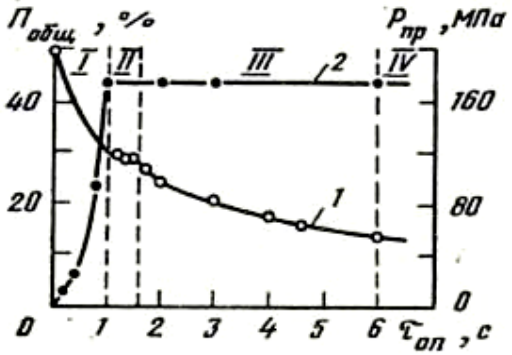


Рис. 1 – Изменение показателей в процессе СВС-прессования γ-TiAl сплава:

1 –пористость; 2 – давление

В экспериментах по определению зависимости общей пористости образцов из γ-TiAl сплава от времени выдержки под давлением (рис. 2) варьировали как марки порошка титана, в значительной мере определяющие температуру пористой заготовки после прохождения по ней волны горения (табл.), так и время выдержки прессования $\tau_в$, отвечающее за температуру начала прессования $T_н$.

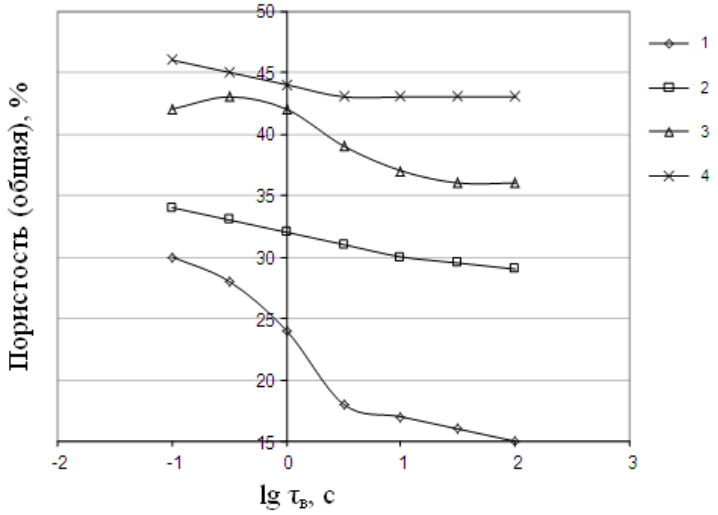


Рис. 2 – Зависимость общей пористости γ-TiAl сплава от времени выдержки под давлением. Шихта на основе электролитического порошка титана (1, 2), губчатого титана (3, 4); $\tau_в$ =1 (1), 9 (2,3), 30 с (4)

Таблица. Условия синтеза шихтовых составов Ti–Al

Тип порошка	Максимальная температура, ^{o}C	Скорость, мм/с
Электролитический	3000	35
Магниетермический	2750	27
Губчатый титан ТГ-100	2200	12

Следует отметить, что процесс прессования в интервале $0 < \tau_{оп} < 1$с протекает в динамических условиях, накладывающих определенные ограничения на возможность анализа исследуемых зависимостей. Однако хорошее совпадение результатов экспериментов позволяет достаточно аргументировано утверждать, что, во-первых, изменение пористости γ-TiAl сплава за время достижения давления и длина горизонтального плато (участок II) в значительной степени зависят от $T_{н}$, определяемой температурой горения состава и $\tau_{в}$, а во-вторых, при повышенных значениях времени задержки горизонтальный участок не фиксируется, что говорит об изменении характера уплотнения материала.

Исследование процесса прессования продуктов синтеза системы Ni–Al (рис. 3) показало, что вид получаемой зависимости аналогичен рассмотренному выше (рис. 2, кривая 4). К тому же характер уплотнения не изменяется при увеличении времени выдержки прессования. Также установлено, что самоуплотнения алюминида никеля в процессе синтеза не происходит (экспериментальное значение общей пористости составляет 50,1, теоретическое – 50,3 %).

По-видимому, характер уплотнения материала обусловлен существованием жидкой фазы в образце, так как основным отличием протекания процесса СВС в рассмотренных выше составах является то, что горение системы Ti-Al происходит без образования жидкой фазы, в то время как при взаимодействие никеля с алюминием плавятся оба реагента, и в зоне реакции происходит слияние и взаимное перемешивание расплавов (реакционная коалесценция) [4].

Закономерности этого процесса пока мало изучены, но, по-видимому, кристаллизация продукта начинается сначала в тех областях расплава, которые обогащены более тугоплавким компонентом – никелем (что согласуется и с диаграммой состояний). Поэтому в зоне реакции кристаллизуется фаза моноалюминида никеля с пониженной концентрацией алюминия, а в зоне догорания происходит донасыщение твердого продукта алюминием, что приводит к появлению горизонтального плато на зависимости $П_{общ} = f(\tau_{в})$. То есть по характеру уплотнения система Ti–Al значительно отличаются от системы Ni-Al.

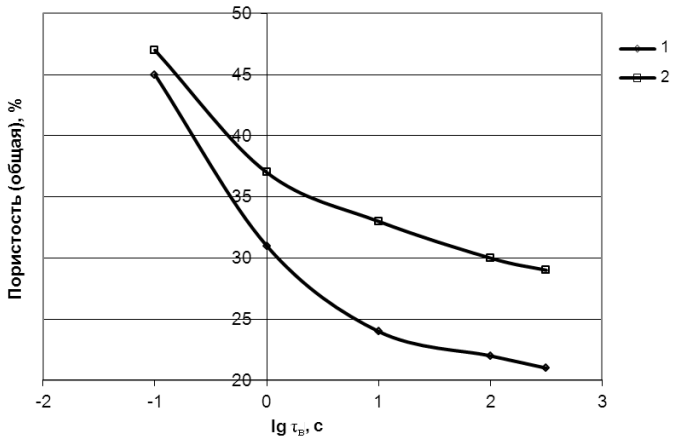


Рис. 3 – Зависимости общей пористости NiAl сплава от времени выдержки под давлением при времени задержки прессования:
1 -3 с; 2 - 15 с

Прессование материалов первой группы характеризуется монотонным увеличением плотности на протяжении всего времени опыта независимо от времени выдержки прессования и температуры образца. При прессовании продуктов синтеза систем второй группы на кривой уплотнения появляется горизонтальный участок II (рис. 1, 2), местоположение и длина которого в значительной степени определяются значениями $\tau_з$ и $T_г$. Во всех случаях перед плато наблюдается резкое снижение пористости сплава (участок I), которое можно объяснить скольжением и аккомодацией тугоплавких зерен [5]. Это предположение подтверждается также тем, что усадка материала в первый момент прессования происходит в основном за счет уменьшения открытой пористости, в то время как уровень закрытой пористости практически не изменяется.

Скольжение зерен позволяет объяснить и появление горизонтального участка на зависимостях $П_{общ} = f(\tau_в)$. Действительно, после завершения процесса скольжения дальнейшее уплотнение материала может происходить только за счет пластической деформации зерен тугоплавкой фазы. Это возможно лишь при условии, что время опыта превышает время деформации $\tau_д$. В случае $\tau_{оп} < \tau_д$ на кривой появляется плато.

Таким образом, анализ литературных и полученных экспериментальных данных позволяет предложить следующий механизм прессования продуктов высокотемпературного реагирования в режиме СВС. После прохождения волны горения по шихтовой заготовке материал представляет собой высокопористую систему, состоящую из образовавшихся зерен тугоплавкой фазы, жидкофазной составляющей (при наличии в исходной смеси компонента, имеющего температуру плавления ниже температуры горения) и исходных компонентов, не успевших вступить в реакцию во фронте и медленно продолжающих

реагировать. В начальный момент прессования уплотнение материала, обусловленное взаимным скольжением образовавшихся зерен друг относительно друга (стадия скольжения, участок I) и их укладкой с максимально возможной для данных условий плотностью, происходит с очень большой скоростью. Роль смазки в этом случае выполняет жидкая фаза. Иногда это может быть и не успевший вступить во взаимодействие компонент реакционной смеси.

Процесс усадки материала в результате проскальзывания и аккомодации зерен протекает при малых нагрузках и в чрезвычайно короткие промежутки времени, а после его завершения уплотнение системы возможно лишь при пластическом деформировании зерен. При $\tau_{оп} < \tau_{д}$ усадки образца не наблюдается.

При увеличении времени прессования начинается пластическое деформирование материала (участок III). На этой стадии образовавшиеся зерна тугоплавких соединений растут, сливаются и деформируются под приложенным давлением, в результате чего происходит резкое закупоривание пор, а общий уровень пористости материала падает.

За окончательное уплотнение материала отвечает процесс диффузионного заплывания пор (участок IV), скорость которого в значительной степени зависит от температуры материала и характеристик жидкой фазы [5]. При низкой температуре или в отсутствие жидкой фазы усадка материала за счет диффузионного залечивания пористости может быть незначительной или не происходит вообще.

Следует отметить, что разделение процесса СВС-прессования на три стадии достаточно условно, так как на каждой из них одновременно протекают все процессы, определяющие уплотнение материала. Речь идет только о преобладающем вкладе каждого процесса в общее уплотнение продукта синтеза на той или иной стадии прессования.

Вывод. Установлено, что изменение пористости интерметаллидных сплавов при СВС-прессовании в значительной степени зависят от температуры начала прессования, определяемой температурой синтеза состава и времени выдержки при давлении $\tau_{в}$. Для получения беспористого материала при СВС-прессовании необходимо, чтобы в продуктах синтеза в достаточном количестве присутствовала жидкая фаза, хорошо смачивающая тугоплавкие зерна и обладающая большим временем существования.

Список литературы: 1. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: теория и практика: сборник статей / Под ред. *А.Е. Сычева*. – Черноголовка: Территория, 2001. – 224 с. **2.** Обробка металів тиском при нестаціонарних температурних умовах: монографія / *Б.П. Середа, І.В. Кругляк, О.А. Жеребцов, Ю.О. Бєлоконь*. – Запоріжжя: ЗДІА, 2009. – 252 с. **3.** *Мержанов, А.Г.* Процессы

горения и синтез материалов / *А.Г. Мержанов*. – Черноголовка: ИСМАН, 1999. – 512 с. **4.** *Амосов, А.П.* Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов / *А.П. Амосов, И.П. Боровинская, А.Г. Мержанов.* – М.: Машиностроение-1, 2007. – 567 с. **5.** *Гегузин,\Я.Е.* Диффузионное деформирование пористых кристаллических структур / *Я.Е. Гегузин* // Физика твердого тела. – № 7. – 1975. – С. 50–54.

Bibliography transliterarated: 1. Samorasprostranyayuschiysya vyisokotemperaturnyiy sintez: teoriya i praktika: sbornik statey pod red. A.E. Syicheva. – Chernogolovka: Territoriya, 2001. – 224 p. 2. Obrobka metalIv tiskom pri nestatsionarnih temperaturnih umovah: monografIya B.P. Sereda, I.V. Kruglyak, O.A. Zherebtsov, Yu.O. Belokon. – Zaporizhzhya: ZDIA, 2009. – 252 p. 3. Merzhanov, A.G. Protsessyi goreniya i sintez materialov A.G. Merzhanov. – Chernogolovka: ISMAN, 1999. – 512 p. 4. Amosov, A.P. Poroshkovaya tehnologiya samorasprostranyayuschegosya vyisokotemperaturnogo sinteza materialov A.P. Amosov, I.P. Borovinskaya, A.G. Merzhanov. – Moscow: Mashinostroenie-1, 2007. – 567 p. 5. Geguzin, Ya.E. Diffuzionnoe deformirovanie poristyih kristallicheskih struktur Ya.E. Geguzin Fizika tverdogo tela. – No 7. – 1975. – p. 50–54.

Поступила (received) 18.11.2014

УДК 621.075.8

М. Е. ТАРАНЕНКО, докт. техн. наук, проф., НАКУ «ХАИ»;
О. Н. КЛИМЕНКО, инженер, НАКУ «ХАИ», Харьков

КВАЛИМЕТРИЯ В ОБРАБОТКЕ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ДАВЛЕНИЕМ

Предлагается метод оценки качества листовых деталей на этапах подготовки производства, а также функциональные зависимости показателей качества от геометрических размеров деталей. Это позволяет выбирать показатели качества на этапе проектирования. Рассматривается показатель технологичности деталей как комплексный. В качестве составляющих частных показателей количественно анализируются свойства: форма детали, её глубины и некоторых локальных элементов (радиус сопряжения бортов). Для этапа изготовления выбрана иерархическая совокупность свойств для оценки качества производимой продукции.

Ключевые слова: качество, листовые детали, квалиметрия, опытные и статистические данные, иерархическая совокупность свойств.

Введение. В современной конкурентной борьбе за рынки сбыта выпускаемой продукции выигрывает тот производитель, качество продукции которого выше. Для объективной оценки качества используют методы теоретической квалиметрии – науки о количественной оценке качества. Известны технические приложения этих методов при изготовлении сортового проката [1], агроквалиметрии [2], квалиметрии в транспорте [3]. В НАКУ «ХАИ» проводятся исследования использования методов квалиметрии в приложении к технологии производства летательных аппаратов, в частности, к штамповке крупногабаритных листовых деталей (КЛД) разными методами.

При анализе производства крупногабаритных листовых деталей (КЛД) можно выделить три характерные группы продукции: детали, оборудование

© М. Е. Тараненко, О. Н. Клименко, 2014

(приспособления, оснастка) и процессы штамповки. Для каждой из этих групп характерны свойства в первую очередь определяющие их качество. К таким свойствам первой группы продукции относятся: технологичность, уровень полученной технологической наследственности (включая уровень и место концентрации остаточных напряжений и утонения), точность формы, качество поверхности. К свойствам второй группы можно отнести: технологическую универсальность (широту технологических возможностей), надежность (безотказность, долговечность, ремонтопригодность, сохранность), экономичность, экологичность, технологичность (при изготовлении оборудования), производительность и т.д. Основными свойствами присущими третьей группе продукции считают: свойство, обеспечивающее получение высокого качества первой и второй групп, малые сроки и стоимость технологической подготовки, производительность, невысокую передаваемую технологическую наследственность, возможность комплексной обработки заготовок, экономичность процесса, управляемость, гибкость и ряд других свойств.

Большинство из этих свойств, характеризуемых определенным показателем качества, являются комплексными, включающими в себя или обеспечиваемые более простыми свойствами. Количественно оценить уровень этих свойств или установить численные значения показателей качества (ПК) является одной из задач технологической квалиметрии. Например, рассмотрим свойство технологичности КЛД. Оно определяется следующими факторами:

– габаритными размерами в плане, глубиной детали, а также их соответствие технологическим возможностям оборудования;

– генеральной формой детали, формой ее локальных элементов и местом их расположения;

– толщиной, допустимой разнотолщинностью и местом ее расположения;

– конструктивными элементами детали (размеры, углы гиба, относительная толщина, коэффициенты вытяжки);

– точностью тех или иных поверхностей или их взаимным расположением;

– стоимостью и длительностью технологической подготовки производства;

– коэффициентом использования материала по листу или по рулону;

– параметрами технологической наследственности.

Эти факторы (при известных объемах производства) определяют выбор схемы и метода штамповки, необходимое оборудование, а, следовательно, себестоимость и трудоемкость изготовления.

Для определения комплексного квалиметрического показателя технологичности предлагается использовать следующую зависимость:

$$П^{\text{техн}} = \sum_{\text{i=1}}^{\text{n}} П_i \ ,$$

где $П_{\text{i}}$ – показатели технологичности по отдельным составляющих её факторов;

n – количество учитываемых факторов.

Здесь не учитывается весомость каждого показателя, так как трудно определить влияние её учета на адекватность полученного результата.

В известной мере наиболее трудно определить численные значения показателя генеральной формы детали. Здесь нами предположено, что любую крупногабаритную деталь можно представить в виде оболочки определенной генеральной формы и наложенных на неё локальных элементов с поперечными размерами значительно меньших размеров генеральной формы. Все разнообразие форм можно расположить вдоль линеек шкал, соответствующих соотношению площадей, соотношению сторон и степени неплоскостности (рис. 1). Последовательность их расположения соответствует сложности формы. Влияние фактора формы полости в плане на сложность и трудоемкость штамповки достаточно сложно оценить каким-либо функционально-объективным показателем. На основании опыта штамповки сложных деталей был предложен следующий подход. Оценить форму полости матрицы отношением её площади в плане к площади вписанной окружности. Эти значения показаны на рис. 1. А затем проверить отношение этих показателей к площади круга с одинаковыми габаритными значениями с результатами опытной штамповки круглого днища средней эллиптичности, квадратной коробчатой детали и детали сложной формы. Такое отношение равно 1,0:1,48:2,42, что в первом приближении соответствует значениям, полученным по отношению площадей 1,0:1,27:(1,88…4,0). Необходимо уточнить, что это отношение получено при анализе процесса штамповки-вытяжки деталей жидкой или эластичной средой и учитывает трудоемкость изготовления оснастки. Расхождение значений объясняется неполным соответствием форм детали, но может быть уточнено с увеличением опытных статистических данных.

Подобный подход к оценке сложности штамповки можно использовать к формам деталей, расположенных вдоль других осей.

Для согласования масштаба шкал по осям используются опытно-статистические данные трудоемкости штамповки, включающие длительность формоизменения, изготовления оснастки и приспособлений, а также приведенные к нормо-часам зарплате и расходу электроэнергии.

Для суммирования показателей формы деталей содержащих все элементы сложности формы используются методы векторного анализа.

Такой подход дает возможность получения численного значения показателя технологичности сложности формы $П_{ф}^{техн}$.

Влияние глубины детали на затрачиваемую для штамповки энергию, а следовательно, на показатель технологичности по глубине оценивается в работе [4]. Там сделан вывод о том, что частный показатель технологичности по потребленной для основных штампуемых форм деталей $П_{н}^{техн}$ увеличивается пропорционально второй степени глубины детали *H*. С учетом стоимости изготовления оснастки он записывается в виде:

$$П_{н}^{техн} = f_1(H^2) + f_2(H^{2,5...4,0}).$$

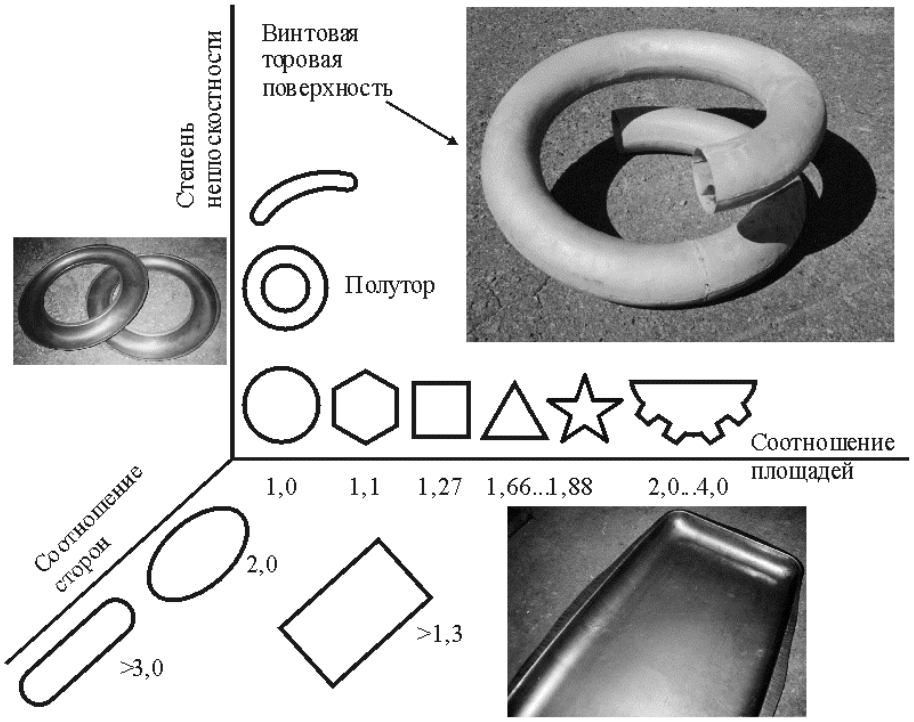


Рис. 1 – Влияние формы полости в плане на сложность процесса штамповки-вытяжки листовых деталей (цифрами показаны значения соотношения площадей фигуры и вписанной окружности): по горизонтальной оси – круглая, многоугольная, квадратная, треугольная, полость с выпукло-вогнутыми участками, полость сложной формы; по вертикальной оси – полутор, спиральный полутор; по оси изометрии – эллипсы (овалы) с разным соотношением сторон, желоба

Диапазон степеней при *H* определяется методом изготовления оснастки.

Такая функция достаточно резко возрастает с увеличением параметра *H*, что позволяет сделать вывод о превалирующем влиянии глубины детали на показатель её технологичности.

Влияние величины радиусов сопряжения бортов между собой и стенки детали с бортами на соответствующий частный показатель технологичности

предлагается оценивать по сложности и количеству необходимых технологических приемов, используемых при штамповке коробчатых деталей. Количественным показателем сложности формообразования трехгранного угла в этом случае служит местный коэффициент вытяжки. Можно показать, что значения этого параметра сопоставимы со шкалой сложности технологических приемов, приведенной в работе [5]. Эти численные значения получены при штамповке коробок эластичной и жидкой средой. Частные показатели технологичности угловых локальных элементов является $П_{\text{улэ}}^{\text{техн}}$ (рис. 2).

Подобным опытно-статистическим подходом можно установить частные показатели технологичности по точности, длительности и стоимости ТПП и другим факторам, определяющим комплексный показатель технологичности при сопоставимости используемых шкал.

Вышеприведенный подход применим для оперативной оценки качества при подготовке производства (этап проектирования).

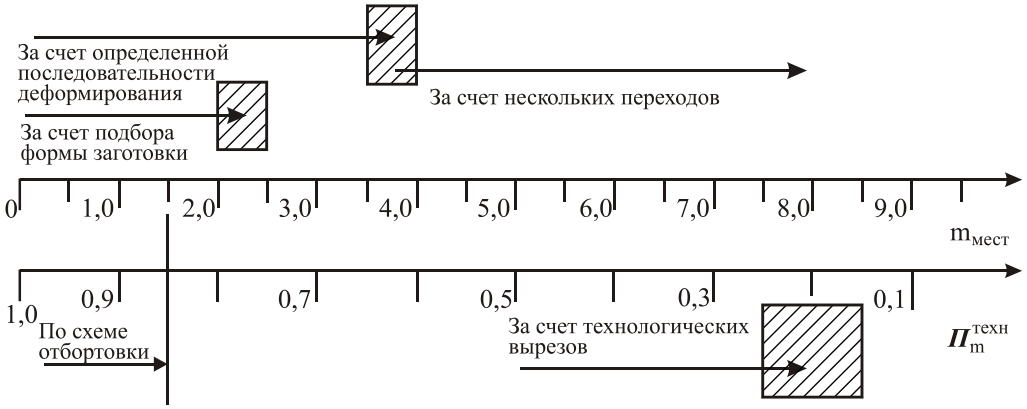


Рис. 2 – Условное совмещение шкалы местного коэффициента вытяжки в угловой зоне коробчатой детали $m_{\text{мест}}$ и шкалы показателя технологичности по форме угла $П_{\text{т}}^{\text{техн}}$ (цифры шкалы условные)

Обобщенный показатель качества на производственном этапе устанавливается с помощью таблиц иерархической совокупности на различных уровнях i-х свойств деталей, подвергнутых той или иной обработке. Численные значения этих свойств измеренные (определенные) при контроле приводятся в относительные значения и свертываются в единый показатель. На первом этапе анализа рекомендуется пользоваться среднеарифметической функцией свертки. Пример показан в таблице.

Таблица. Иерархическая совокупность на различных уровнях *i*-х свойств крупногабаритных листовых деталей

Группы квалиметрических свойств продукции				
i=0	***i=1***	***i=2***	***i=3***	***i=4***
1	2	3	4	5
Качество крупногабаритных листовых деталей	Геометрические размеры проката	Габаритные формы	…	–
		Соотношение отдельных элементов	…	–
		Отклонение размеров	–	–
	Качество металла	Структура	Макроструктура	–
			Микроструктура	–
		Механические свойства	Растяжение	Временное сопротивление
				Предел текучести
				Относительное удлинение
				Относительное сужение
			Ударная вязкость	Работа разрушения
				Процент вязкой составляющей
			Твердость	…
				…
			Технологическая проба	…
				…
		Внутренние дефекты	…	–
			…	–
			Свариваемость	–
		Специальные свойства	Коррозионная стойкость	…
			…	–
	Качество поверхности	Состояние поверхности, образующей профиль	Наличие или отсутствие зазоров (+; -) …	
			Неравномерность вытяжки фланца (+; -) …	
			Наличие «лимонной корки»	…

Прочерки обозначают отсутствие показателя. Многоточие – условные значения

Выводы. Таким образом, в первом приближении, можно оценить квалиметрические показатели качества крупногабаритных листовых деталей.

Список литературы: **1.** *Найзабеков А.В.* Квалиметрия в обработке металлов давлением [Электр] / *А.В. Найзабеков, В.А. Талмазон, Н.Ю. Шмидт*: учеб. пособие / Алматы РИК по УиМЛ, 2005.– 134 с. **2.** *Ковтун І.* Агроквалiметрiя [Текст] / *І. Ковтун, Д.І. Мазоренко, В.І. Пастухов, П.А. Джолис*.– Х:.

РВП «Оригінал», 2000.– 314 с. **3.** *Бурдаков В.Д.* Квалиметрия транспортных средств. Методика оценки эффективности использования [Текст] / *В.Д. Бурдаков*.– М.: Изд-во стандартов, 1990.–166 с. **4.** *Тараненко М.Е.* Инжиниринг качества (техноквалиметрии) [Текст]: учеб. пособие / *М.Е. Тараненко, А.В. Романцов*.– Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2008.– 129 с. **5.** *Тараненко М.Е.* Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы [Текст]: монография в 2 ч. / *М.Е. Тараненко*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т. ХАИ, 2011.– 272 с.

Bibliography (transliterated): **1.** *Nayzabekov A.V.* Kvalimetria v obrabotke metallov davleniem [Electr.] A.V. Nayzabekov, V.A. Talmazon, N.U. Shmidt: ucheb. posobie Almaty RIK o UiML, 2005.– 134 p.. **2.** *Kovtun I.* Agrokvalimetria [Tekst] I. Kovtun, D.I. Mazorenko, V.I. Pastuhov, P.A. Dzholi P. – Kharkov: RVP «Oryginal», 2000.– 314 p. **3.** *Burdakov V.D.* Kvalimetria transportnyh sredstv. Metodika ocenki efektivnosti ispolzovania [Tekst] V.D. Burdakov.– Moscow: Izd-vo standartov, 1990. – 166 p. **4.** *Taranenko M.E.* Inginiring kachestva (tehnokvalimetrii) [Tekst]: ucheb. posobie M.E. Taranenko, A.V. Romancov.– Naz. aerokosmoscow un-t «KhAI», 2008. – 129 p. **5.** *Taranenko M.E.* Electrogidravlicheskays shtampovka: teoria, oborudovanie, tehprocessy [Tekst]: monografia v 2 ch. M.E. Taranenko. – Kharkov: Naz. aerokosmos un-t. HAI, 2011. – 272 p.

Поступила (received) 05.11.2014

УДК 621.7.044:658.512.011.56

В. В. ТРЕТЬЯК, канд. техн. наук, доц., НАУ «ХАИ»;
Н. Ф. САВЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., ХНЭУ;
С. А. ДИТИНЕНКО, канд. техн. наук, доц., ХНЭУ, Харьков;
А. В. ОНОПЧЕНКО, мл. науч. сотр., ХАИ;
А. Ф. ФЕДОРОВА, инженер 1 категории, НАУ «ХАИ», Харьков

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА КЛАССИФИКАЦИИ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Представлены возможности программного комплекса классификации листовых деталей для анализа технологичности листовых деталей. Выявлены особенности использования импульсных технологий для изготовления сложных листовых деталей для аэрокосмического комплекса. Представлены общая схема использования оснастки и оборудования для импульсной технологи варианты различного нагружения заготовки импульсными источниками энергии. Предложена схема обработки информации интерактивным программным комплексом. Представлен перечень меню работы программного комплекса и даны рекомендации по его использованию.

Ключевые слова: интерактивный программный комплекс, импульсные технологии, объектный подход к проектированию импульсных технологий

Введение. В конструкциях современных летательных аппаратов сложные листовые детали составляют наиболее многочисленную группу в общей номенклатуре изделия.

Например, в авиационных двигателях такие детали используются в узлах компрессора, камеры сгорания и соплового аппарата.

Технологические процессы изготовления указанной группы деталей, применяемые в настоящее время на производстве, относятся к одним из наиболее сложных и трудоемких процессов.

© В. В. Третьяк, Н. Ф. Савченко, С. А. Дитиненко, А. В. Онопченко, А. Ф. Федорова, 2014

Особые сложности при формообразовании возникают при изготовлении деталей из высокопрочных сплавов типа ВТ20, ВТ5-1, ВТ6. Эти титановые сплавы крайне затруднительно обрабатывать в холодном состоянии.

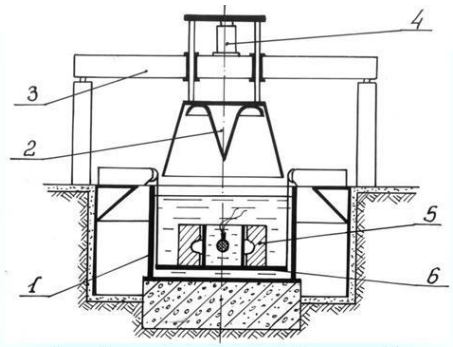
Разнообразие источников энергии, технологических процессов и схем для импульсного деформирования заготовок позволяет успешно использовать их в различных областях техники.

В Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» накоплен большой теоретический и практический потенциал для разработки перспективных технологий импульсной штамповки [1].

Для изготовления деталей в настоящее время используются взрывная, штамповка, электрогидравлическая штамповка, штамповка на пресс-пушках и др.

Данные способы являются экономически целесообразными, особенно для малых серий, поскольку появляется возможность значительного упрощения оснастки, сокращения технологического цикла и улучшения культуры производства (рис. 1).

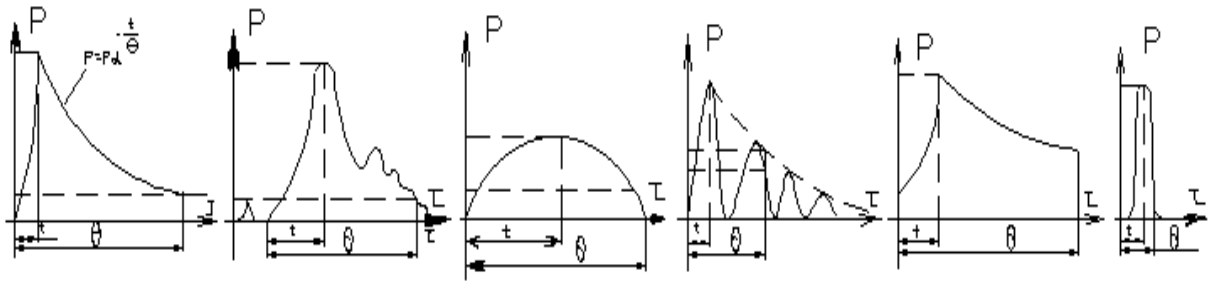
Однако сложность физических процессов, трудности разработки технологических процессов для новых типов деталей диктует необходимость использования новых подходов в принципах построения технологических процессов, а также необходимость подключения современных математических методов [2] для формирования как маршрутной, так и операционной технологии.



1–бассейн, 2–рассекатель, 3–кранбалка, 4–амортизатор, 5–матрица, 6–гидроподъемник

Рис. 1 – Оборудование и оснастка для взрывной штамповки

Особенности описания импульсных процессов. В отличие от статических методов, при анализе которых основное внимание уделяется механике процесса пластической деформации, импульсные процессы необходимо рассматривать с особенностями превращения одного вида энергии в другой. Обычно в основу классификации методов положены характеристики вида нагрузки заготовки (рис. 2).



а б в г д е

Рис. 2 – Характеристика параметров нагружения для импульсных процессов:
а – штамповка взрывом; б – электрогидравлическая штамповка; в – гидроударная штамповка; г – магнитно-импульсная штамповка; д – горение газовой смеси; е – термическое воздействие лазерного луча

При этом для всех способов эпюра давления $P(\tau)$ существенно зависит от времени достижения максимального давления t, параметра пикового давления P_{max} и времени снижения давления в е раз θ.

Математическая модель для описания конструкторско-технологической информации листовых деталей. Проектирование данных технологических процессов с использованием максимальных возможностей данных методов и оптимизация решений связана с анализом и синтезом многофакторной информации, которая должна быть систематизирована и обработана соответствующим математическим аппаратом, освоенным современной наукой и удобным для производства.

Как правило, для работы с такого рода данными имеется уже отработанная информационная база для освоенных и внедренных процессов. Наличие такой базы при соответствующей систематизации информации позволяет предприятию сохранять и приумножать свой технологический опыт, делая его доступным для новых поколений технологов.

Современные системы автоматизированного проектирования позволяют легко осуществлять такую работу лишь для хорошо формализованной и полностью разработанной математической модели технологического процесса. Только в этом случае удается для уникальных деталей вести обработку информации технологами-экспертами с минимально возможными трудозатратами без привлечения посторонних расчетчиков, в том числе высокопрофессиональных программистов.

В современных системах автоматизированного проектирования для описания технологических знаний используются принципы объектного представления знаний.

Традиционные методы описания конструкторско-техногологических признаков деталей, получаемых импульсной штамповкой не приемлемы для данного способа получения детали, поэтому в программе использован принципиально новый разработанный метод описания сложных деталей, использованный для получения импульсными способами, адаптированный для традиционных методов импульсной листовой штамповки [3].

Для описания признаков детали также использован объектный подход для описания как детали, так и технологического процесса.

Для определения элементов технологических процессов используется структурно-аналитический метод распознавания образов.

На рис. 3 представлена общая последовательность работы модулей программы «Классификатор».

По предложенному методу декомпозиции конструкторско-технологических признаков в программе наполнена опытная выборка деталей. Программа позволяет подготавливать массивы данных для классификационной обработки программой «Классификатор», проводить статистический анализ полученных данных для определения их достоверности и выдачи технологических рекомендаций для бездефектного их изготовления.

Рис. 3 – Общая последовательность работы модулей программы «Классификатор листовых деталей для импульсной обработки программы»

Общий состав меню интерактивного прграммнного комплекса. Главное меню программы представлено на рис. 4. Основные модули программы представлены следующими пунктами меню: файл, поиск, настройка, ТЭД (таблицы эмпирических данных), классификатор, массивы, статистика дерева, статистика ТЭД, графика, база, каталог, оборудование, о программе.

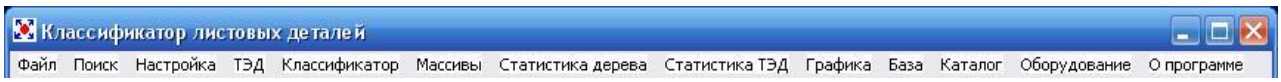


Рис. 4 – Главное меню программы

На большинстве авиационных предприятий, выпускающих силовые установки, самолёты и другие летательных аппараты могут быть изготовлены листовые различной, в том числе сложной конфигурации.

В меню «Каталог» представлены типовые представители деталей, технология которых разрабатывалась и апробировалась при участии специалистов ХАИ.К таким деталям можно отнести обечайки, днища, кольца, кожуха, желоба, фланцы, патрубки, жесткости, коробки, обшивки.

В меню «Каталог» (рис. 5) представлена краткая характеристика типовых представителей деталей и их фотографии.

Рис. 5 – Меню «Каталог»

В меню «Оборудование» (рис. 6) представлены странички информации для подготовки технологических процессов: полигон, бассейновые установки, бронекамеры, взрывные пресса, детонационно-газовые и электрические установки, пресс-пушки.

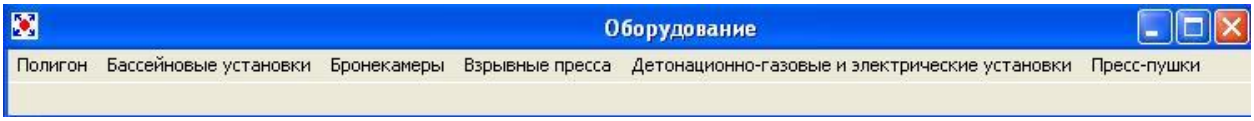


Рис. 6 – Меню Оборудование

В меню» Деформационные поля» представлен модуль расчета полей деформации для деталей типа «Жесткость». Основными данными для расчета деформационных максимальных деформаций является длина и ширина ячейки, угол ее наклона и внутренний радиус ячейки (рис. 7).

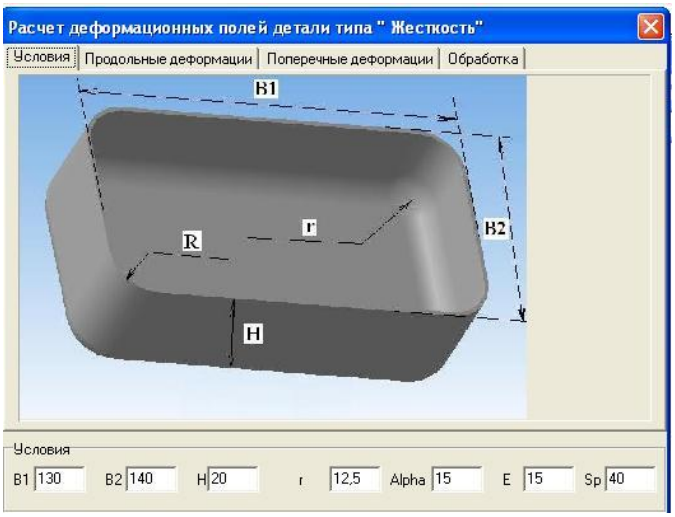


Рис. 7 – Задание данных для расчета деформационного поля детали типа «Жесткости»

Выводы. Представленный интерактивный программный комплекс может быть использован для формирования новых технологических процессов и расчета технологических параметров импульсных процессов, а также эффективен при оценке технологичности листовых деталей при их изготовлении импульсными нагрузками [4].

Разработанный интерактивный программный комплекс апробирован в учебном процессе в дипломном проектировании магистров при проектировании технологии опытных деталей авиационных двигателей.

Список литературы: 1. *Борисевич В. К.* Тенденции и проблемы развития импульсных технологий [Текст] / *В. К. Борисевич* // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і літакобудуванні: тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ: Донбаська державна машинобудівна академія. – 2002. – С. 16-20. **2.** *Сироджа И. Б.* Структурно-аналитический метод распознавания образов с разнотипными признаками [Текст] / *И. Б. Сироджа* // Математические методы анализа динамических систем. – Х. – 1981. Вып. 5. – С. 91-107. **3.** *Третьяк В. В.* Объектный подход к проектированию ресурсосберегающих импульсных технологий [Текст] / *В. В. Третьяк* //Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. № 11(47). – С. 245-254. **4.** Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір « Комп'ютерна програма «Інтерактивний програмний комплекс класифікації листових деталей для виготовлення імпульсними технологіями» / В. В. Третяк, А. И. Долматов, Л. А. Фіилипковская, Ю. О. Невешкін, А. В. Онопченко //№50070, Дата реєстрації 08.07. 2013.

Bibliography (transliterated): 1. Borisevich V. K. Tendentsii i problemyi razvitiya impulsnyih tehnologiy [Tekst] / V. K. Borisevich // Udoskonalennya protsesIv I obladnannya obrobki tiskom v metalurgIYi I lItakobuduvannI: tematichniy zbIrnik naukovih prats. – Kramatorsk: Donbaska derzhavna mashinobudIvna akademIya. – 2002. – P. 16-20. **2.** Sirodzha I. B. Strukturno-analiticheskiy metod raspoznavaniya obrazov s raznotipnyimi priznakami [Tekst] / I. B. Sirodzha // Matematicheskie metodyi analiza dinamicheskih sistem. – H. – 1981. Vyip. 5. – P. 91-107. **3.** Tretyak V. V. Ob'ektnyiy podhod k proektirovaniyu resursosberegayuschih impulsnyih tehnologiy [Tekst] / V. V. Tretyak //Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya. – 2006. No 11(47). – P. 245-254. **4.** SvIdotstvo pro reestratsIyu avtorskogo prava na tvIr « Komp'yuterna programa «Interaktivniy programniy kompleks klasifikatsii listovih detaley dlya vigotovlennya impulsnimi tehnologiyami» / V. V. Tretyak, A. I. Dolmatov, L. A. Filipkovskaya, Yu. O. NeveshkIn, A. V. Onopchenko // No 50070, Data reestratsii 08.07. 2013.

Поступила (received) 05.02.2012

УДК 628.16:621.981.3

О. І. ТРИШЕВСЬКИЙ, докт. техн.наук, проф., ХНТУСГ ім. П.Василенка;
М. В.САЛТАВЕЦЬ, інженер, ХНТУСГ ім. П. Василенка**,** Харків

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРОКАТКИ

Викладені результати теоретичних досліджень моделювання теплового стану смуги з використанням надшвидкісного охолодження (UFC) для підвищення ефективності процесів прокатки тонкого листа. Отримані дані зіставлені з результатами експериментальних досліджень французьких дослідників.

© О. І. Тришевський, М. В.Салтавець, 2014

Реконструкція теплового поля цих досліджень показала неможливість використання ці результати для проектування реальних процесів прокатки, у зв'язку з чим рекомендовано користуватися розробленою авторами методикою математичного моделювання.

Ключові слова: гаряча прокатка, полоса, математична модель, тепловий стан, зверхшвідкісне охолодження.

Вступ. Відомо, що з метою скорочення часу технологічного процесу і економії енергетичних витрат, розроблено устаткування для надшвидкісного охолодження листа (ULTRA FAST COOLING – UFC) на ділянках перед чистовою групою клітей і після чистової групи перед моталкою [1]. Процес UFC, наприклад, застосовано на металургійному заводі в місті Карлам (Франція). Передбачено використання такого процесу при реконструкції існуючого прокатного обладнання на інших металургійних заводах Європи.

На Україні не існує прокатних станів V покоління, а також сучасних методів проектування технологічного процесу прокатки. Для реконструкції існуючих і створення новітніх станів, необхідно відпрацювати методики проектування окремих ділянок технологічного процесу, які є на станах V покоління.

Аналіз останніх досліджень та літератури. Оскільки в новій технології надзвичайно важливою складовою частиною є примусове охолодження полоси під час процесу прокатки, значний інтерес представляє робота [1], в якій описано лабораторну установку для надшвидкісного охолодження полоси. Вказано кількість форсунок, відстань між форсунками і, навіть, відстань між рядами форсунок. Приведено графіки падіння температури поверхонь (верхньої і нижньої), а також середини зразка полоси товщиною 20 мм, що охолоджували на лабораторній установці.

Однак, при спробі скористатися наведеною в [1] інформацією, виникає дуже багато запитань, а ціна відповіді на них розробників технології виявилась завеликою навіть для крупних вітчизняних машинобудівних заводів, таких, як,наприклад, НКМЗ.

Для прискорення вирішення питань створення вітчизняної технології та устаткування для надшвидкісного охолодження полоси між чорновою і чистовою групою клітей в роботі [2] розроблено математичні моделі і пакети програм на С++ для їх реалізації.

Мета досліджень, постановка проблеми. Для відпрацювання надійної методики проектування ділянки нового технологічного процесу при прокатці листа необхідно вирішити декілька задач. Перш над усе – шляхом рішення тестових задач потрібно доказати можливість математичного моделювання елементів нових технологічних процесів прокатки. Встановити достовірність інформації про надшвидкісне охолодження, наведену у іноземній технічній

літературі та можливість її використання на практиці. Враховуючи високі складність і вартість натурних експериментів, результати теоретичних досліджень треба зіставити з експериментальними даними, отриманими дослідниками надшвидкісного охолодження полоси у Франції [1].

Матеріали досліджень. Перша тестова задача полягає у математичному моделюванні ділянки нового технологічного процесу надшвидкісного охолодження полоси, з вихідними даними подібними, до наведених у роботі [1].

Вихідні дані: товщина листа на виході з чорновий кліті – 20 мм; температура листа – 1030°С; швидкість транспортування полоси до чистової кліті – 4 м/хв; відстань від чорнової кліті до ділянки UFC – 3 м.

Обмеження на керуючі впливи: довжина ділянки UFC – 4 м; – температура на вході в чистову кліть – 830°С; – інтенсивність охолодження верхньої і нижньої поверхні однакові; – різниця температури по перетину листа на вході в чистову кліть не повинна перевищувати 10°С.

Потрібно визначити таку інтенсивність охолодження, що забезпечує задані умови і мінімальну відстань між чорновою і чистовою клітями.

Результати рішення першої тестової задачі, виконаного на основі роботи [2], представлено на рис.1. В математичній моделі використовували значення теплофізичних характеристик полоси для сталі Ст.3сп.

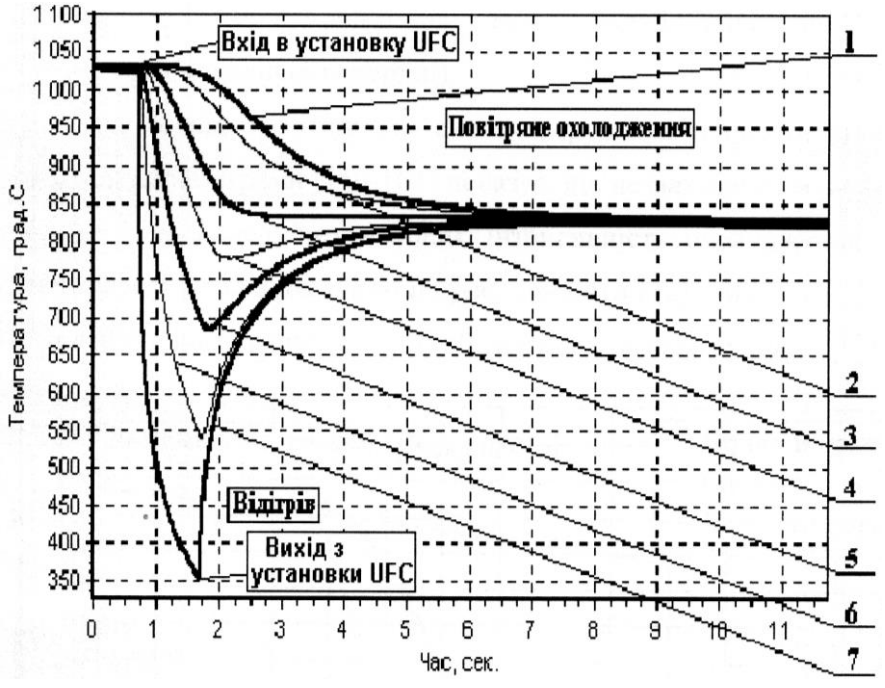


Рис. 1 – Теплове поле полоси товщиною 20 мм при UFC: 1 – середина полоси; 2 – відстань 7,2 мм від поверхні; 3 – 4,8 мм від поверхні; 4 – 3,6 мм від поверхні; 5 – 2,4 мм від поверхні; 6 – 1,2 мм від поверхні; 7 – поверхня полоси.

Як видно з графіків, за рахунок UFC, на ділянці довжиною 4 м відбувається зниження температури листа з 1030°С до 830°С.

При цьому, температура верхньої і нижньої поверхонь на виході з UFC складає 350°С. Температуру середини листа за час 1 с. UFC практично не змінює. Характер спаду температури по перетину листа істотно залежить від відстані до поверхні, що охолоджується. Природно, що чим ближче розташований шар до поверхні листа, тим інтенсивніше відбувається його охолодження.

Після виходу полоси з установки UFC на рольганг, починається процес відігрівання поверхні полоси і її підповерхневих шарів. У середині листа спостерігається зворотний процес – охолодження глибинних шарів полоси. У шарах на глибині 4,8 мм від верхньої і нижньої поверхонь, через 1 с. після виходу з установки UFC, відбувається стабілізація температури. Вона залишається майже незмінною на ділянці повітряного охолодження (рольганг).

Максимальна різниця температури, обумовлена технологією (10°С), по перетину листа досягається через 9 с. після виходу полоси з чорнової кліті, що відповідає ділянці між чорновою і чистовою клітями довжиною 36 м. Відстань між клітями може бути скорочено до 32 м з урахуванням того, що через 8 с. різниця температури по перетину полоси складає 11°С.

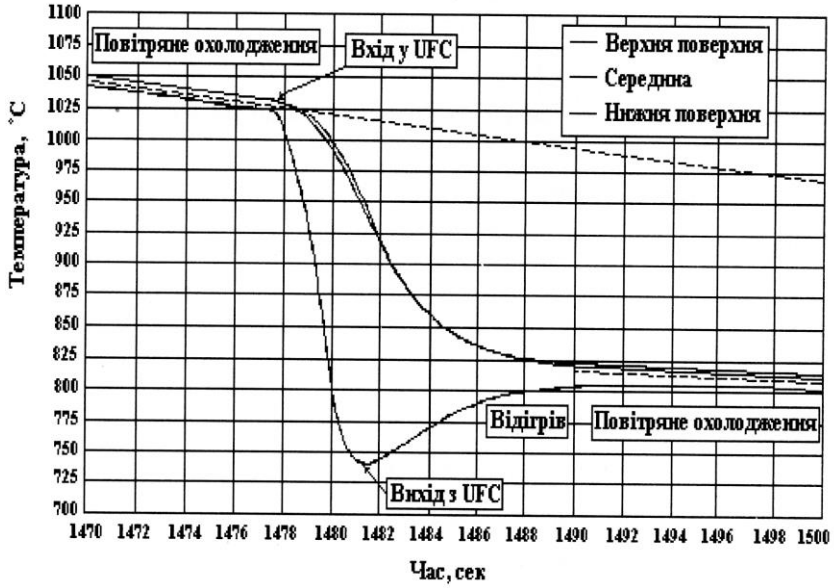


Рис. 2 – Зміна температури в прокаті товщиною 20 мм на лабораторній установці за допомогою пристрою для охолодження з розподілом води верх/низ – 50/50 (копія рис. 4 з роботи [1])

Таким чином, показано, що здійснення надшвидкісного охолодження цілком реально. Природно, що розрахунки повинні бути доповнені експериментальними дослідженнями конструкцій для подачі води на полосу. У цьому зв'язку становлять великий інтерес дослідження, виконані в рамках

пілотного проекту по створенню першої установки надшвидкісного охолодження [1]. Однак є невідповідності в описі, щодо тиску який використовується в системі подачі охолоджувача (12 і 3 бар). Не зрозумілий і тип охолодження – водяне, водно – повітряне або комбіноване (різне для верхньої і нижньої поверхні).

Крім того, досвід проектування систем керування тепловим станом об'єктів з розподіленими параметрами [3–5] показує, що незважаючи на розподіл води для охолодження полоси верх/низ – 50/50, інтенсивність охолодження знизу значно менша ніж зверху. Внаслідок цього на рис. 4 роботи [1] (див.рис.2) температура нижньої поверхні листа в процесі UFC збігається з температурою середини листа.

На рис. 3 переставлено результати другого експерименту з охолодження полоси (рис. 5 з роботи [1]).

Як видно з рис. 3, температура нижньої поверхні через 4 с. після виходу з установки UFC залишається майже незмінною протягом 12 с.

Подібний характер зміни температури ідентичний зміні температури підповерхнєвого шару полоси розташованому від поверхні на відстані 4,8 мм (рішення першої тестової задачі, рис. 1).

Крім того, характер зміни температури так званої "верхньої поверхні" рис.3 (рис. 5 з роботи [1]) ідентичний змінам температур підповерхнєвих шарів полоси, розташованих на відстані 1,2 мм від поверхні – крива 6; 2,4 мм від поверхні – крива 5; 3,6 мм від поверхні – крива 4 (див. рішення першої тестової задачі, рис. 1).

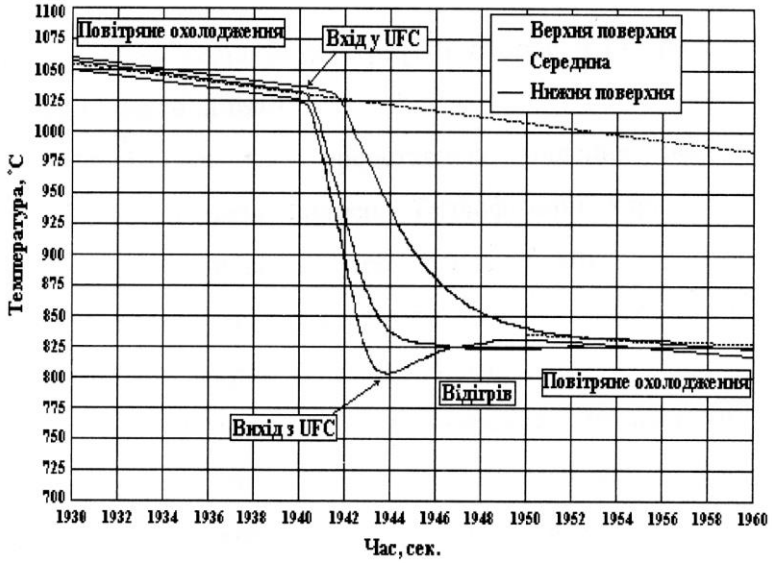


Рис. 3 – Зміна температури в прокаті товщиною 20 мм на лабораторній установці за допомогою пристрою для охолодження з розподілом води верх/низ – 40/60 (копія рис. 5 з роботи [1])

Враховуючи високу вартість виконання досліджень методом фізичного моделювання, становить значний інтерес розшифровка приведених у роботі [1] результатів. Для цього вирішена друга тестова задача по обробці результатів роботи [1] з метою використання їх для проектування елементів нової технології прокатки листа.

Подібна задача ускладнюється тим, що необхідно вирішити інверсну і зворотну задачі теплопровідності з метою уточнення теплофізичних характеристик матеріалу, з якого було зроблено зразок у дослідженнях [1] і визначення глибини установки термопар при лабораторних дослідженнях. Тільки після виконання подібної роботи можна оцінити коефіцієнти тепловіддачі від поверхонь листа до води, що забезпечує регламентоване технологією охолодження полоси і раціональне використання води.

При рішенні інверсної задачі, у якості контрольних даних використовували результати охолодження листа на повітрі [1]. На рис. 2 і рис. 3 ці залежності представлені штриховими лініями.

На рис. 4 і рис. 5 представлено рішення зворотної задачі при реконструкції теплового поля полоси. Теплофізичні характеристики матеріалу встановили ітераційним шляхом при реконструкції теплового поля зразка використовуючи дані про зміну температури поверхні листа при його охолодженні на повітрі (штрихові лінії на рис. 2 і рис. 3).

Ітераційним шляхом знаходили такі залежності температури шарів від часу охолодження, які співпадали з даними роботи [1] про залежності температур середини, «верхньої» і «нижньої» поверхонь з точністю 10°С. Цей підхід дозволив встановити фактичну глибину установки термопар у дослідженнях [1]. При математичному моделюванні умов проведення лабораторних досліджень найбільш повний збіг результатів теоретичного рішення з даними [1] має місце за умови, що так звана "нижня поверхня" розташована на глибині 4,8 мм, а "верхня поверхня" – на відстані 2,4 мм від поверхні зразка. У такому випадку, теоретичний графік зміни температур по перетину зразка товщиною 20 мм (рис. 4) практично збігається з експериментальним графіком (рис. 2) на всіх ділянках охолодження.

Результати реконструкції теплового поля зразка приведені на рис. 4.

Незважаючи на подачу однакової кількості води на верхню і нижню поверхню (50/50) у дослідженнях [1] коефіцієнт тепловіддачі на верхній поверхні в 2,5 рази вище, ніж на нижній. Ці дані підтверджують приведену в [1] думку про неефективну роботу нижніх пристроїв для охолодження на лабораторній установці в початковий період виконання досліджень.

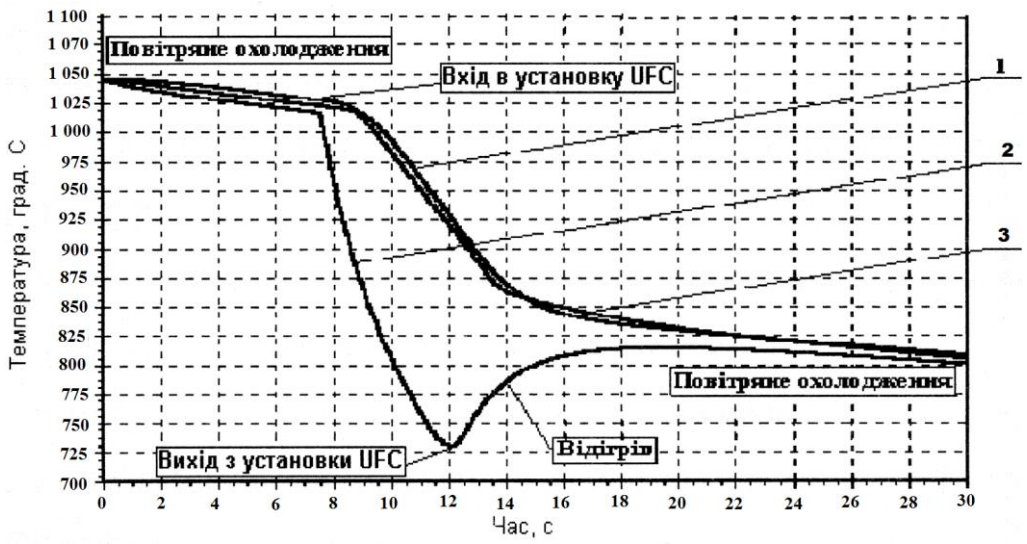


Рис. 4 – Теплове поле зразка товщиною 20 мм з охолодженням 50/50: 1 – середина листа; 2 – 2,4 мм від верхньої поверхні; 3 – 4,8 мм від нижньої поверхні

Рішення другої тестової задачі – реконструкція теплового поля зразка, дала змогу не тільки встановити суттєву різницю коефіцієнтів тепловіддачі на нижній і верхній поверхнях, але і довести, що охолодження листа залежить не тільки від кількості води. Як було показано вище, однакова кількість води, яка подавалась на охолодження поверхонь полоси, у роботі [1] використовувалась неоднаково ефективно. Тому при проектуванні систем охолодження полоси слід мати на увазі, що суттєвим є, крім того, ще і спосіб подачі води.

У поняття спосіб подачі води входять: – переріз потоку води, який формується геометрією форсунки; – кут нахилу вісі форсунки до поверхні полоси; – розташування форсунок на колекторі відносно вісі прокатки; – зона ефективної дії потоку води з однієї форсунки; – перекриття зон ефективної дії потоків води; – існування зон, у яких перетинаються потоки води з різних форсунок.

На рис. 5 приведена реконструкція теплового поля полоси товщиною 20 мм за даними з рис. 3.

Результати математичного моделювання (рис. 4 і рис. 5) умов проведення роботи [1] свідчать, що авторам вдалося експериментальним шляхом домогтися ефективної роботи нижніх пристроїв для охолодження полоси.

Товстими лініями показано залежності температур від часу на глибинах 2,4 мм від верхньої поверхні, 4,8 мм від нижньої поверхні і в середині зразка, які збігаються з експериментальними температурами в роботі [1] (верхня поверхня, нижня поверхня, середина) з точністю 10°С. Тонкими лініями показано теоретичні значення фактичних температур на верхній і нижній поверхнях в процесі експерименту [1].

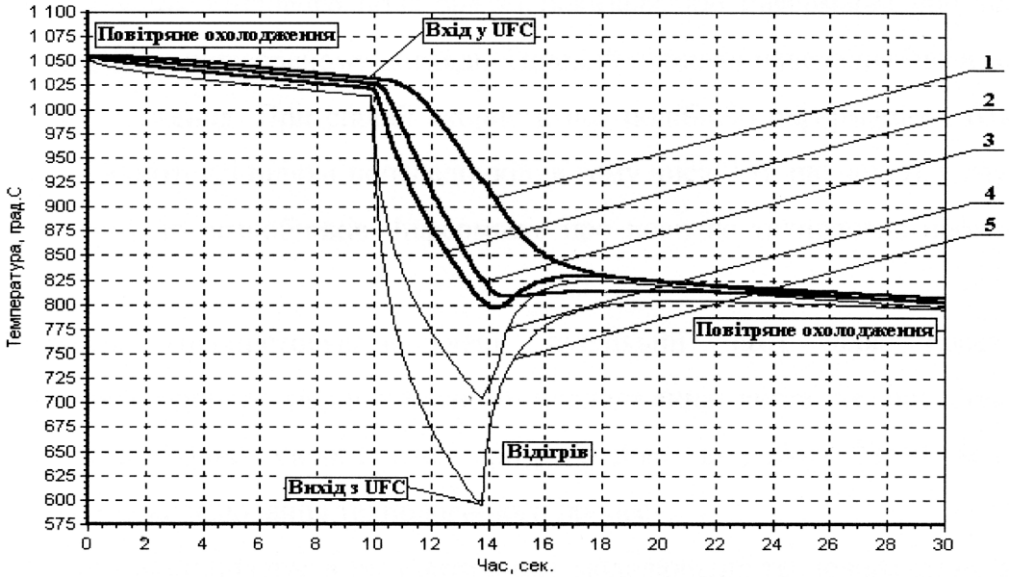


Рис. 5 – Теплове поле зразка товщиною 20 мм з охолодженням 40/60 після реконструкції: 1 – середина листа; 2 – 2,4 мм від верхньої поверхні; 3 – 4,8 мм від нижньої поверхні; 4 – верхня поверхня; 5– нижня поверхня

Знання фактичних температур на верхній і нижній поверхнях дозволило коректно вирішити зворотну задачу теплопровідності – визначити коефіцієнт тепловіддачі від поверхні полоси до води.

Коефіцієнт тепловіддачі від нижньої поверхні полоси до води збільшився в 3,5 рази в порівнянні з результатами, приведеними на рис. 4. Відношення коефіцієнтів тепловіддачі від верхньої і нижньої поверхонь тепер складає 1/1,6, при співвідношенні кількості води, що подається 40/60 або 1/1,5. Майже повний збіг відносин коефіцієнтів тепловіддачі верх/низ з відношенням кількості води, що подається (1/1,6; 1/1,5) свідчить про розробку авторами [1] працездатної конструкції пристроїв для охолодження полоси.

Реконструкція теплового поля зразка показала, що інформація роботи [1] про установку UFC приведена в спотвореному вигляді. При спробі скористатися подібною інформацією, бажаючим прийдеться пройти усі шляхи попередників, в тому числі і ті, що ведуть у глухий кут, або звернутися до розробників. Інформація про новітню технологію прокатки має ціну.

Оскільки використовувати дані публікації [1] для проектування технологічного процесу надшвидкісного охолодження листа не представляється можливим, необхідно скористатися розробленою в роботі [2] методикою математичного моделювання технологічного процесу.

Суть методики полягає в математичному моделюванні теплового стану листа на ділянці технологічного процесу, що проектується (див. тестову задачу номер один). З теоретичного розрахунку визначається необхідна інтенсивність

охолодження (коефіцієнт тепловіддачі) для верхньої і нижньої поверхонь. Різні значення коефіцієнтів тепловіддачі для поверхонь можуть бути обумовлені вимогою технології, з метою уникнення «ефекту лижі» – загину листа вниз.

Необхідні значення коефіцієнтів тепловіддачі від полоси до води повинні бути отримані з експериментальних досліджень при використанні різних типів форсунок.

Висновки. 1. Шляхом рішення тестових задач, доказано можливість математичного моделювання елементів нових технологічних процесів прокатки. Встановлено, що інформація про надшвидкісне охолодження, наведена у іноземній технічній літературі у вигляді, що виключає можливість використання.

2. Враховуючи високу складність і високу вартість натурних експериментів результати теоретичних досліджень співставлено з даними експериментальних досліджень процесу надшвидкісного охолодження полоси., отриманими англійськими та французькими дослідниками теплового стану валків.

3. Запропонований метод математичного моделювання теплового стану полоси є перспективним, оскільки у цьому випадку відпадає необхідність проведення безлічі експериментальних досліджень високої вартості. Він дозволив уточнити характер течії металу в зоні деформації. Для доповнення математичної моделі необхідно лише, експериментальним шляхом, отримати значення коефіцієнтів тепловіддачі від полоси до води.

Список літератури: 1. *De Paepe, Simon P., Moerkerke I., Hermann J.C.* Control of the temperature of the bar on entry to the finisher // ECSC STEEL RTD PROGRAMME. – 2000. – P. 1–9. **2.** *Тришевский О. И., Салтавец Н. В.* Разработка математической модели теплового состояния полосы при прокатке // Сталь. – 2009. – № 2. – С. 42–49. **3.** *Тришевський О. І., Салтавець М. В.* Система реєстрації температури в процесах обробки металів тиском. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Краматорськ: ДДМА. – 2005. – С.107–110. **4.** *Тришевський О. І., Салтавець М. В.*Оцінка зусиль на валки від металу, що прокатується. // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків:НТУ «ХПІ». – 2005. № 24. – 272 с. **5.** *Тришевский О. И., Салтавец Н. В.* Проектирование элементов новой технологи прокатки листа. //Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 8. Пластична деформація металів.– Дніпропетровськ: НМетАУ. – 2005. – С. 248–251.

Bibliography (transliterated): 1. De Paepe, Simon P., Moerkerke I., Hermann J.C. Control of the temperature of the bar on entry to the finisher ECSC STEEL RTD PROGRAMME. – 2000. – P. 1–9. **2.** Trishevskiyj O. I., Saltavec N. V. Razrabotka matematicheskoyj modeli teplovogo sostoyaniya polosih pri prokatke Stalj. – 2009. – No 2. – P. 42–49. **3.** Trishevsjkiyj O. I., Saltavecj M. V. Sistema reєstracії temperaturi v procesakh obrobki metaliv tiskoMoscow Udoskonalennya procesiv i obladnannya obrobki tiskom v metalurgiї i mashinobuduvanni: Kramatorsjk: DDMA.–2005. P. 107–110. **4.** Trishevsjkiyj O. I., Saltavecj MOSCOW V.Ocinka zusilj na valki vid metalu, tho prokatuєtjsya. Visnik nacionaljnogo tekhnichnogo universitetu «Kharkivsjkiyj politekhnichniyj institut» – Kharkiv: NTU «KhPI».–2005. No 24. –272 P. **5**. Trishevskiyj O. I., Saltavec N. V. Proektirovanie ehlementov novoyj tekhnologi prokatki lista. Suchasni problemi metalurgiї. Naukovi visti. Tom 8. Plastichna deformaciya metaliv. – Dnipropetrovsjk: NMetAU. – 2005. – P. 248–251.

Поступила (received) 05.10.2014

УДК 621.762

О. І. ХОМЕНКО, канд. техн. наук, ст. наук. сотр., ІПМ НАНУ;
Г. А. БАГЛЮК, докт. техн. наук, заст. директора, ІПМ НАНУ, Київ

МОДЕЛЮВАННЯ УЩІЛЬНЕННЯ КОНІЧНОЇ ПОРОШКОВОЇ ЗАГОТОВКИ В ЗАКРИТІЙ ЖОРСТКІЙ МАТРИЦІ

Розглянуто математичну модель однобічного ущільнення конічної заготовки двома пуансонами в закритій жорсткій матриці в припущенні наявності радіальної складової плину матеріалу у циліндричних (технологічних) частинах матриці. Описано методику комп'ютерного моделювання процесу при ущільненні окремо верхнім та нижнім пуансонами. З'ясовано, що комп'ютерне моделювання у порівнянні з натурним призводить до якісно подібної картини розподілу пористості. Деякі кількісні відхилення можна пояснити як припущеннями при моделюванні, так і похибками експерименту.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, порошковий матеріал, ущільнення, матриця, пуансон.

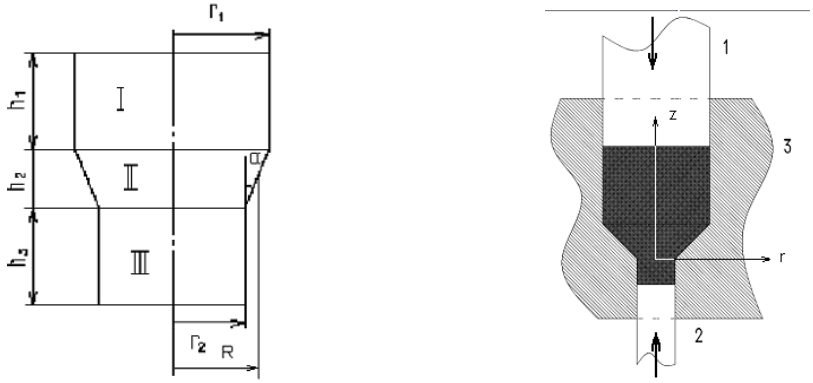
Вступ. Досить часто створення машин та механізмів потребує деталей конічної чи близької до конічної форми. Виготовлення таких деталей литтям не завжди забезпечує потрібну точність, а механічною обробкою циліндричних заготовок – до підвищених втрат матеріалу. Крім того, подальше ущільнення конічних заготовок у циліндричній матриці цікаве ще й з точки зору отримання матеріалів з високою густиною. Перспективними для отримання конічних деталей уявляються методи порошкової металургії. Виготовленню конічних деталей цими методами присвячено ряд праць, але у більшості з них акцент зроблено на технологічних особливостях процесу (режим ущільнення, конструкція обладнання, тощо), в той час, як теоретичні питання висвітлено недостатньо всебічно. Ця стаття є спробою в якійсь мірі доповнити дослідження процесу ущільнення конічних порошкових заготовок.

Мета дослідження. Метою роботи є математичне моделювання процесу ущільнення заготовки у вигляді усіченого конуса двома пуансонами в жорсткій закритій матриці.

Матеріали дослідження. Матриця для ущільнення заготовки у вигляді усіченого конуса має складатися з двох циліндричних частин з радіусами r_1 і r_2 та висотами h_1 і h_3, відповідно, та середньої частини у вигляді усіченого конуса з радіусами основ r_1 і r_2 та висотою h_2 (рис. 1, а). Радіальну координату будь-якої точки на поверхні заготовки тут і надалі будемо позначати як R з відповідним індексом, маючи на увазі, що у циліндричних частинах ця координата є сталою, а у конічній – лінійною функцією осьової координати z.

© О. І. Хоменко, Г. А. Баглюк, 2014

Циліндричні частини, у яких пересуваються верхній 1 та нижній 2 пуансони (рис. 1, б), відіграють суто технологічну роль, а деталь формується саме у конічній частині.



а б

Рис. 1 – Матриця для ущільнення заготовки: а – схема заготовки, б – схема ущільнення

Нехай верхній пуансон 1 рухається у абсолютно жорсткій матриці 3 зі швидкістю v_u, а нижній пуансон 2 – назустріч йому зі швидкістю v_l. При v_u=0 або v_l=0 матиме місце однобічне пресування. З фізичних міркувань розуміло, що верхній пуансон може пересуватися на відстань, що не перебільшує h_1. Для певності будемо вважати, що й нижній пуансон пересувається на відстань, що не перевищує h_3, попри те, що фізично він здатний просуватися навіть у конічній частині прес-форми. Початок координат умовно розмістимо у точці перетину осі заготовки з площиною межі частин II та III (рис. 1, б).

Розглянемо спочатку однобічне ущільнення верхнім пуансоном. Компоненти швидкості плину матеріалу та тензора швидкості деформації будемо позначати верхнім індексом U. Оскільки у кожній частині заготовки матеріал при ущільненні буде рухатись по-різному, нижній індекс компонент буде містити номер частини заготовки.

На осі заготовки радіальна складова швидкості плину матеріалу дорівнюватиме нулю, виходячи з умови рівноваги заготовки при ущільненні. У частинах I і III (циліндричні частини) на поверхні заготовки радіальна складова швидкості плину матеріалу також дорівнюватиме нулю, виходячи з умови жорсткості прес-форми, тож будуть справедливі наступні граничні умови:

$$\left.\begin{aligned} v_{Ir}^{U}\Big|_{r=0} &= v_{IIIr}^{U}\Big|_{r=0} = 0 \\ v_{Ir}^{U}\Big|_{r=r_1} &= v_{IIIr}^{U}\Big|_{r=r_2} = 0 \\ v_{Iz}^{U}\Big|_{z=z_{max}} &= -v_u \\ v_{IIIz}^{U}\Big|_{z=z_{min}} &= 0 \end{aligned}\right\}. \qquad (1)$$

В конічній частині при ущільненні матеріал буде ковзати по поверхні матриці, через що швидкість плину буде мати ненульову радіальну складову. Будемо виходити з нерозривності швдкості ковзання матеріалу по поверхні матриці.

Припустимо, що радіальна складова швидкості плину матеріалу у конічній частині заготовки по абсолютній величині зростає лінійно від нульового значення на осі до максимального значення на поверхні конічної частини v_{IIR}

$$\left.\begin{aligned} v_{IIr}^{U}\Big|_{r=0} &= 0 \\ v_{IIr}^{U}\Big|_{r_2 \le R \le r_1} &= v_{IIR} \end{aligned}\right\}. \qquad (2)$$

Нульові значення радіальної складової швидкості на поверхні циліндричної частини та на осі заготовки не виключають ненульових значень радіальної складової швидкості між віссю заготовки і поверхнею матриці, тож, згідно [1], будемо вважати

$$\left.\begin{aligned} v_{Ir}^{U} &= \frac{a_3 \nu v_u}{h_1} r^2 (r_1 - r) \cdot \left(1 + a_4 (z - h_1 - h_2)(h_2 - z)\right) \\ v_{IIIr}^{U} &= \frac{a_5 \nu v_u}{h_3} r^2 (r_2 - r) \cdot \left(1 + a_6 z (h_3 + z)\right) \end{aligned}\right\}, \qquad (3)$$

де a_3, a_4, a_5 і a_6 – деякі параметри, ν – коефіцієнт Пуассона.

Для другої частини максимальне значення радіальної складової швидкості плину визначимо, виходячи зі швидкості ковзання матеріалу по конічній поверхні. Її, в свою чергу, знайдемо, виходячи зі швидкостей ковзання по циліндричним поверхням. Для опису осьової компоненти швидкості плину матеріалу у цих частинах скористалися наступним виразом

$$v_z^U = -\frac{v_u (z + h_3)}{H}\left(1 - a_1\left(1 + a_2 \frac{r^2}{R^2}\right)\left(1 - \frac{z + h_3}{H}\right)\right), \qquad (4)$$

де $H = h_1 + h_2 + h_3$,

a_1 та a_2 – деякі параметри,

$R_I = r_1 = const$, $R_{III} = r_2 = const$.

Вираз (4) є по суті рівнянням, запропонованим у [2], модифікованим з урахуванням геометричних характеристик заготовки та обраної системи координат. Очевидно, що він задовольняє граничним умовам на торцях пуансонів. Швидкість ковзання матеріалу по поверхні для першої і третьої частин матриці отримали з (4) при $r = r_1$ та $r = r_2$, відповідно:

$$v_{Ik}^U = v_{IIIk}^U = -\frac{v_u(z+h_3)}{H}\left(1-a_1\left(1+a_2\right)\left(1-\frac{z+h_3}{H}\right)\right). \quad (5)$$

Припустимо, що для конічної частини матриці швидкість ковзання матеріалу також визначається співвідношенням (5). Радіальну компоненту вектора швидкості ковзання знайдемо як його проекцію на відповідну координатну вісь:

$$v_{IIr}^U\Big|_{r=R_{II}} = v_{IIk}^U \frac{r_1 - r_2}{\sqrt{h_2^2 + (r_1 - r_2)^2}}. \quad (6)$$

Значення радіальної складової швидкості плину у довільній точці другої частини заготовки визначимо лінійною інтерполяцією:

$$v_{IIr}^U = \frac{r}{R_{II}} v_{IIr}^U\Big|_{r=R_{II}} = \frac{rh_2}{(r_1 - r_2)z + r_2 h_2} v_{IIr}^U\Big|_{r=R_{II}}. \quad (7)$$

Значення осьової компоненти швидкості плину матеріалу у довільній точці другої частини заготовки визначали згідно виразу (4), до якого підставили у явному вигляді $R_{II} = \frac{(r_1 - r_2)z + r_2 h_2}{h_2}$:

$$v_{IIz}^U = -\frac{v_u(z+h_3)}{H}\left(1-a_1\left(1+a_2\frac{h_2^2 r^2}{\left((r_1-r_2)z+r_2h_2\right)^2}\right)\left(1-\frac{z+h_3}{H}\right)\right). \quad (8)$$

З виразів (3), (4), (7) та (8), щ визначають поле швидкостей плину, отримали компоненти тензора швидкостей деформації в наступному вигляді:

$$e_{Iz}^U = -\frac{v_u}{H}\left(1-a_1\left(1+a_2\frac{r^2}{r_1^2}\right)\left(1-\frac{2(z+h_3)}{H}\right)\right),$$

$$e_{IIz}^U = -\frac{v_u}{H}\left(1+a_1\left(\frac{2a_2h_2^2r^2(r_1-r_2)(z+h_3)(H-(z+h_3))}{H((r_1-r_2)z-r_2h_2)^3}-\left(1+\frac{a_2h_2^2r^2}{((r_1-r_2)z-r_2h_2)^2}\right)\frac{H-2(z+h_3)}{H}\right)\right),$$

$$e_{IIIz}^U = -\frac{v_u}{H}\left(1-a_1\left(1+a_2\frac{r^2}{r_2^2}\right)\left(1-\frac{2(z+h_3)}{H}\right)\right),$$

$$e_{Ir}^U = \frac{a_3 w_u}{h_1}(2r_1 r - 3r^2)\cdot\left(1+a_4(z-h_1-h_2)(h_2-z)\right),$$

$$e_{IIr}^U = \frac{v_u(r_1-r_2)h_2(z+h_3)}{H\sqrt{h_2^2+(r_1-r_2)^2}\,((r_1-r_2)z+r_2h_2)}\left(1-a_1\left(1+a_2\right)\left(1-\frac{z+h_3}{H}\right)\right),$$

$$e_{IIIr}^U = \frac{a_5\nu v_u}{h_3}(2r_2r-3r^2)\cdot\left(1+a_6z(h_3+z)\right),$$

$$e_{I\varphi}^U = \frac{a_3\nu v_u}{h_1}r(r_1-r)\cdot\left(1+a_4(z-h_1-h_2)(h_2-z)\right), \qquad (9)$$

$$e_{II\varphi}^U = \frac{v_u(r_1-r_2)h_2(z+h_3)}{H\sqrt{h_2^2+(r_1-r_2)^2}\,((r_1-r_2)z+r_2h_2)}\left(1-a_1\left(1+a_2\right)\left(1-\frac{z+h_3}{H}\right)\right),$$

$$e_{III\varphi}^U = \frac{a_5\nu v_u}{h_3}r(r_2-r)\cdot\left(1+a_6z(h_3+z)\right),$$

$$\gamma_{Irz}^U = \frac{a_3\nu v_u}{h_1}r^2(r_1-r)\cdot\left(1+a_4(2z-h_1-2h_2)\right)+\frac{2a_1a_2v_ur(z+h_3)(H-z-h_3)}{r_1^2H^2}$$

$$\gamma_{IIrz}^U = -\frac{v_ur(r_1-r_2)h_2}{H\sqrt{h_2^2+(r_1-r_2)^2}\,((r_1-r_2)z+r_2h_2)}\left(\left(1-a_1\left(1+a_2\right)\left(1-\frac{2(z+h_3)}{H}\right)\right)-\right.$$

$$\left.-\frac{r_1-r_2}{(r_1-r_2)z+r_2h_2}\left(1-a_1\left(1+a_2\right)\left(1-\frac{z+h_3}{H}\right)\right)+\frac{2a_1a_2h_2(z+h_3)}{(r_1-r_{2)}z+r_2h_2}\left(1-\frac{z+h_3}{H}\right)\right),$$

$$\gamma_{IIIrz}^U = \frac{a_5\nu v_u}{h_3}r^2(r_2-r)\cdot\left(1+a_6(h_3+2z)\right)+\frac{2a_1a_2v_ur(z+h_3)(H-z-h_3)}{r_2^2H^2}.$$

Інтенсивність деформації розраховували як

$$H = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\sqrt{(e_r-e_z)^2+(e_z-e_\varphi)^2+(e_r-e_\varphi)^2+6\gamma_{rz}^2}. \qquad (10)$$

Верхній індекс при змінних у (10) відсутній, бо цей вираз стосується також ущільнення нижнім пуансоном.

Для моделювання ущільнення користувалися прямим варіаційним методом. Складова енергетичного функціоналу, що визначається внутрішніми силами опору деформації, з урахуванням того, що елемент об'єму $dV = rdrdzd\varphi$, матиме наступний вигляд:

$$J_1 = \Sigma\iiint_V\sqrt{(e_r+e_\varphi+e_z)^2 f_1(\theta)+H^2 f_2(\theta)}dV, \qquad (11)$$

Швидкість ковзаня матеріалу на бічних стінках матриці визначали згідно (5). Для першої та третьої частин заготовки врахували також тертя на торцях верхнього та нижнього пуансонів. Якщо вважати коефіцієнт тертя на торцях пуансонів і на бічних стінках матриці однаковим, складова варіаційного функціоналу, зумовлена тертям, становитиме

$$J_2 = \sqrt{3\mu}\left(\iint\limits_{F_{Iu}} \sqrt{f_2(\theta)v_{Ir}^2}\,dF_{Iu} + \iint\limits_{F_I} \sqrt{f_2(\theta)v_{Ik}^2}\,dF_I + \iint\limits_{F_{II}} \sqrt{f_2(\theta)v_{IIk}^2}\,dF_{II} + \right.$$
$$\left. + \iint\limits_{F_{III}} \sqrt{f_2(\theta)v_{IIIk}^2}\,dF_I + \iint\limits_{F_{IIId}} \sqrt{f_2(\theta)v_{IIIr}^2}\,dF_{IIIl} \right) \qquad (12)$$

де $dF_{Iu} = rdrd\varphi$ $(0 \le r \le r_1)$ – елемент поверхні торця верхнього пуансона;

$dF_I = r_1 d\varphi dz$, $dF_{II} = \pi(r_1 + r_2)\sqrt{(r_1 - r_2)^2 + h_2^2}\,d\varphi dz$, $dF_{III} = r_2 d\varphi dz$ – елементи бічних поверхонь першої, другої та третьої частин заготовки, відповідно;

$dF_{IIIl} = rdrd\varphi$ $(0 \le r \le r_2)$ – елемент поверхні торця нижнього пуансона.

Варіюванням коефіцієнтів a_i мінімізували суму $J = J_1 + J_2$, а після цього розраховували положення будь-якої точки заготовки при русі пуансона у певні моменти часу. Для визначеності площу осьового перерізу заготовки покрили уявною ортогональною сіткою та розраховували положення її вузлів через кожну секунду. Відповідно до нових положень вузлів сітки перераховували значення пористості у кожній комірці сітки за відомими співвідношеннями.

Тепер розглянемо однобічне ущільнення одним нижнім пуансоном, який рухається з швидкістю v_l у напрямку, що співпадає з додатним положенням осі z. Компоненти швидкості плину та тензора швидкостей деформації позначимо верхнім індексом L. Тоді поле швидкостей плину визначатиметься наступними виразами:

$$v_{Iz}^L = \frac{v_l(h_1 + h_2 - z)}{H}\left(1 - a_8\left(1 + a_9\frac{r^2}{r_1^2}\right)\left(1 - \frac{h_1 + h_2 - z}{H}\right)\right),$$

$$v_{IIz}^L = \frac{v_l(h_1 + h_2 - z)}{H}\left(1 - a_8\left(1 + \frac{a_9 h_2^2 r^2}{\left((r_1 - r_2)z + r_2 h_2\right)^2}\right)\left(1 - \frac{h_1 + h_2 - z}{H}\right)\right),$$

$$v_{IIIz}^L = \frac{v_l(h_1 + h_2 - z)}{H}\left(1 - a_8\left(1 + a_9\frac{r^2}{r_2^2}\right)\left(1 - \frac{h_1 + h_2 - z}{H}\right)\right), \qquad (13)$$

$$v_{Ir}^L = \frac{a_{10}\nu v_l}{h_1} r^2(r_1 - r)\cdot\left(1 + a_{11}(z - h_1 - h_2)(h_2 - z)\right),$$

$$v_{IIr}^L = \frac{v_l(r_1 - r_2)h_2 r(h_1 + h_2 - z)}{H\sqrt{h_2^2 + (r_1 - r_2)^2}\left((r_1 - r_2)z + r_2 h_2\right)}\left(1 - a_8\left(1 + \frac{a_9 h_2^2 r^2}{\left((r_1 - r_2)z + r_2 h_2\right)^2}\right)\left(1 - \frac{h_1 + h_2 - z}{H}\right)\right),$$

$$v_{IIIr}^L = \frac{a_{12}\nu v_l}{h_3} r^2(r_2 - r)\cdot\left(1 + a_{13}z(h_3 + z)\right).$$

Відповідно, компоненти тензора швидкостей деформації визначили наступним чином:

$$e_{Iz}^{L}=-\frac{v_l}{H}\left(1-a_8\left(1+a_9\frac{r^2}{r_1^2}\right)\left(1-\frac{2(h_1+h_2-z)}{H}\right)\right),$$

$$e_{IIz}^{L}-\frac{v_l}{H}\left(1-a_8\left(\frac{2a_9h_2^2r^2(r_1-r_2)(h_1+h_2-z)(H-(h_1+h_2-z))}{H\left((r_1-r_2)z+r_2h_2\right)^3}-\left(1+\frac{a_9h_2^2r^2}{\left((r_1-r_2)z+r_2h_2\right)^2}\right)\frac{H-2(h_1+h_2-z)}{H}\right)\right),$$

$$e_{IIIz}^{L}=-\frac{v_l}{H}\left(1-a_8\left(1+a_9\frac{r^2}{r_2^2}\right)\left(1-\frac{2(h_1+h_2-z)}{H}\right)\right),$$

$$e_{Ir}^{L}=\frac{a_{10}\nu v_l}{h_1}(2r_1r-3r^2)\cdot\left(1+a_{11}(z-h_1-h_2)(h_2-z)\right),$$

$$e_{IIr}^{L}=\frac{v_l(r_1-r_2)h_2(h_1+h_2-z)}{H\sqrt{h_2^2+(r_1-r_2)^2}\left((r_1-r_2)z+r_2h_2\right)}\left(1-a_8\left(1+a_9\right)\left(1-\frac{h_1+h_2-z}{H}\right)\right), \qquad (14)$$

$$e_{IIIr}^{L}=\frac{a_{13}\nu v_l}{h_3}(2r_2r-3r^2)\cdot\left(1+a_{14}z(h_3+z)\right),$$

$$e_{I\varphi}^{L}=\frac{a_{10}\nu v_l}{h_1}r(r_1-r)\cdot\left(1+a_{11}(z-h_1-h_2)(h_2-z)\right),$$

$$e_{II\varphi}^{L}=\frac{v_l(r_1-r_2)h_2(h_1+h_2-z)}{H\sqrt{h_2^2+(r_1-r_2)^2}\left((r_1-r_2)z+r_2h_2\right)}\left(1-a_8\left(1+a_9\right)\left(1-\frac{h_1+h_2-z}{H}\right)\right),$$

$$e_{III\varphi}^{L}=\frac{a_{12}\nu v_l}{h_3}r(r_2-r)\cdot\left(1+a_{13}z(h_3+z)\right),$$

$$\gamma_{Irz}^{L}=v_l\left(\frac{a_{10}\nu}{h_1}r^2(r_1-r)\cdot\left(1+a_{11}(-2z+h_1+2h_2)\right)-\frac{2a_8a_9(h_1+h_2-z)r}{r_1^2H}\left(1-\frac{h_1+h_2-z}{H}\right)\right),$$

$$\gamma_{IIrz}^{L}=-\frac{v_lh_2(r_1-r_2)r}{H\sqrt{h_2^2+(r_1-r_2)^2}\left((r_1-r_2)z+r_2h_2\right)}\left(\left(1+a_8\left(1+a_9\right)\left(1-\frac{2(h_1+h_2-z)}{H}\right)\right)+\right.$$

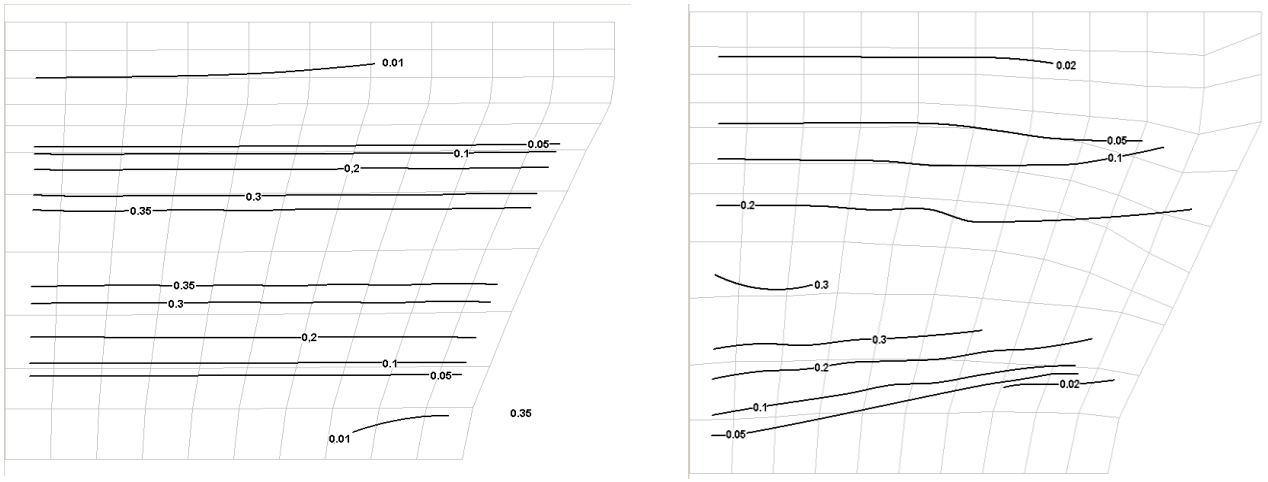
$$\left.+\frac{r_1-r_2}{\left((r_1-r_2)z+r_2h_2\right)}\left(1-a_8\left(1+a_9\right)\left(1-\frac{h_1+h_2-z}{H}\right)\right)+\frac{2a_8a_9h_2(h_1+h_2-z)}{\left((r_1-r_2)z+r_2h_2\right)}\left(1-\frac{h_1+h_2-z}{H}\right)\right),$$

$$\gamma_{IIIrz}^{L}=v_l\left(\frac{a_{13}\nu}{h_3}r^2(r_2-r)\cdot\left(1+a_{14}(h_3+2z)\right)-\frac{2a_8a_9(h_1+h_2-z)r}{r_2^2H}\left(1-\frac{h_1+h_2-z}{H}\right)\right).$$

Швидкість ковзання матеріалу на бічних стінках матриці за аналогією з (5) складе

$$v_{Ik}^{L}=v_{IIk}^{L}=v_{IIIk}^{L}=\frac{v_l(h_1+h_2-z)}{H}\left(1-a_8\left(1+a_9\right)\left(1-\frac{h_1+h_2-z}{H}\right)\right), \qquad (15)$$

Так само, як у випадку ущільнення одним верхнім пуансоном, енергетичний функціонал складають згідно (11) і (12), мінімізують його варіюванням параметрів, визначають нові положення точок заготовки при ущільненні та розраховують нові значення пористості у цих точках.



а б

Рис. 2 – Розподіл ліній рівної пористості: а – при моделюванні, б – у шаруватій заготовці

Результат моделювання у вигляді карти розподілу ліній рівної пористості наведений на рис. 2, а. На рис. 2, б наведено карту розподілу ліній рівної пористості для натурної конічної заготовки. Карту отримано з результатами обробки шліфа шаруватої заготовки візіопластичним методом*.

Висновки. Середня пористість заготовки, розрахована згідно запропонованої моделі, дорівнює 11% і добре узгоджується зі значенням, отриманим експериментально (12%). Якісно карта розподілу ліній рівної пористості також узгоджується з картою, отриманою експериментально. Деякі кількісні розбіжності пояснюються в першу чергу неможливістю отримання ідеально рівних поверхонь при виготовленні шаруватих заготовок, похибками вимірювань на шліфі та припущеннями при моделюванні. Отримані результати підтверджують придатність запропонованої моделі для дослідження процесу ущільнення конічних заготовок у закритій жорсткій матриці.

Список літератури: 1. *Хоменко О.І. Баглюк Г.А.,Куріхін В.С.* Урахування радіальної складової швидкості плину порошкових матеріалів при моделюванні процесу ущільнення в закритому штампі [Текст]/*О.І.Хоменко, Г.А.Баглюк, В.С.Куріхін*//Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2012. – №46.– С.135-143. **2.** *Баглюк Г.А.* Сравнительный анализ схем нагружения при горячем доуплотнении пористой заготовки в закрытом штампе [Текст] / *Г.А.Баглюк, М.Б.Штерн, В.Л.Юрчук* // Порошковая металлургия. – 1979. – №11 – С.19–22.

Bibliography (transliterated): 1. *Khomenko, O.I., Baglyuk, G. A., Kurikhin, V. P. «*Urakhuvannja radial'noj skladovoji shvydkosti plynu poroshkovykh materialiv pry modelyuvanni ushchil'nennja v zakrytomu shtampi». Visnyk NTU «KhPI». No. 46. 2012. – P. 135–143. **2.** *Baglyuk, G. A., Shtern, M.B., Yurchuk, V.L.* «Sravnitel'nyj analiz skhem nagruzhenija pri gorjachem douplotnenii poristoj zagotovki v zakrytom shtampe» Poroshkovaja metallurgija. No.11. – 1979. P. 19–22.

Поступила (received) 05.11.2014

*** Шаруваті заготовки виготовлено асп. Куріхіним В.С.

УДК 621.923

В. Г. ШКУРУПИЙ, канд. техн. наук, ХНЭУ;
Ф. В. НОВИКОВ, докт. техн. наук, ХНЭУ;
А. Г. КРЮК, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТКИ ПРИ АБРАЗИВНОМ ПОЛИРОВАНИИ

При фиксированном радиальном усилии удельное давление в зоне обработки при абразивном полировании уменьшается вследствие увеличения относительной опорной длины микропрофиля обрабатываемой исходной поверхности. В результате уменьшается фактическая скорость радиальной подачи, что соответствует схеме выхаживания при шлифовании. Показано, что схема абразивного полирования с фиксированным радиальным усилием оптимальна для обеспечения условий уменьшения шероховатости при обработке поверхностей со значительной исходной шероховатостью.

Ключевые слова: абразивное полирование, шероховатость поверхности, радиальное усилие, скорость радиальной подачи, схема выхаживания.

Введение. Технологическое обеспечение качества обработки деталей машин требует применения прогрессивных методов финишной обработки, одним из которых является метод абразивного полирования. Несмотря на большой опыт, накопленный в области абразивного полирования, возможности этого метода обработки используются не в полной мере. Поэтому актуальны дальнейшие исследования технологических возможностей абразивного полирования.

Анализ последних достижений и литературы. В работах [1–3] раскрыта физическая сущность и даны практические рекомендации по эффективному применению абразивного полирования. Приведены результаты многочисленных экспериментальных исследований шероховатости поверхности при полировании. Однако, приведенные в этих работах эмпирические зависимости параметров шероховатости поверхности справедливы для частных условий обработки и не позволяют получить обобщенные решения, охватывающие широкие диапазоны изменения технологических параметров. Поэтому важной задачей является разработка математической модели определения параметров шероховатости поверхности при абразивном полировании и выявление на ее основе новых условий высококачественной обработки.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является теоретическое обоснование путей уменьшения шероховатости поверхности при абразивном полировании на основе ее аналитического описания и анализа.

© В. Г. Шкурупий, Ф. В. Новиков, А. Г. Крюк, 2014

Материалы исследования. Абразивное полирование предназначено для уменьшения исходной шероховатости поверхности на обрабатываемой детали. Для этого инструмент, на рабочей поверхности которого расположены абразивные зерна, совершает вращательное и радиальное движения со скоростью радиальной подачи $S_{\text{рад}}$. Поскольку производится, по сути, обработка микронеровностей исходной поверхности образца, описываемой вероятностной функцией $\Phi(y)$ [4] (рис. 1,а), то фактическая площадь контакта инструмента с образцом $F(y) = B \cdot H \cdot \Phi(y)$ в начальный момент процесса значительно меньше номинальной площади $F = B \cdot H$ (для абсолютно гладкой поверхности). Здесь B и H – ширина и длина обрабатываемого образца. Исходя из такого представления процесса абразивного полирования, при фиксированной скорости радиальной подачи $S_{\text{рад}}$ образца радиальная составляющая силы резания P_y в начальный момент обработки будет наименьшей и по мере съема микронеровностей будет увеличиваться. По такому же закону будет изменяться и производительность обработки Q (рис. 1,а). Шероховатость поверхности в конечный момент обработки будет зависеть от скорости радиальной подачи: чем она больше, тем больше будет и шероховатость поверхности. Поэтому с точки зрения уменьшения шероховатости поверхности, очевидно, скорость радиальной подачи $S_{\text{рад}}$ целесообразно уменьшать. Однако это приведет к снижению производительности Q, что неэффективно. Таким образом, имеет место противоречие, связанное с противоположным влиянием скорости радиальной подачи $S_{\text{рад}}$ на шероховатость и производительность обработки Q. Чтобы исключить данное противоречие, на практике предложено процесс абразивного полирования осуществлять с фиксированным радиальным усилием P_y (рис. 1,б). Это позволяет в начальный момент обработки съем металла в виде значительных микронеровностей на обрабатываемой поверхности производить с увеличенной скоростью радиальной подачи $S_{\text{рад}}$, т.к. фактическая площадь контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью образца $F(y) = B \cdot H \cdot \Phi(y)$ в этом случае небольшая. По мере съема микронеровностей и перехода к съему сплошного металла скорость радиальной подачи $S_{\text{рад}}$ будет уменьшаться, а это приведет к уменьшению шероховатости обработанной поверхности. По закону изменения скорости радиальной подачи $S_{\text{рад}}$ будет изменяться и удельное давление $P_{y\partial} = P_y / F(y)$ (рис. 1,б).

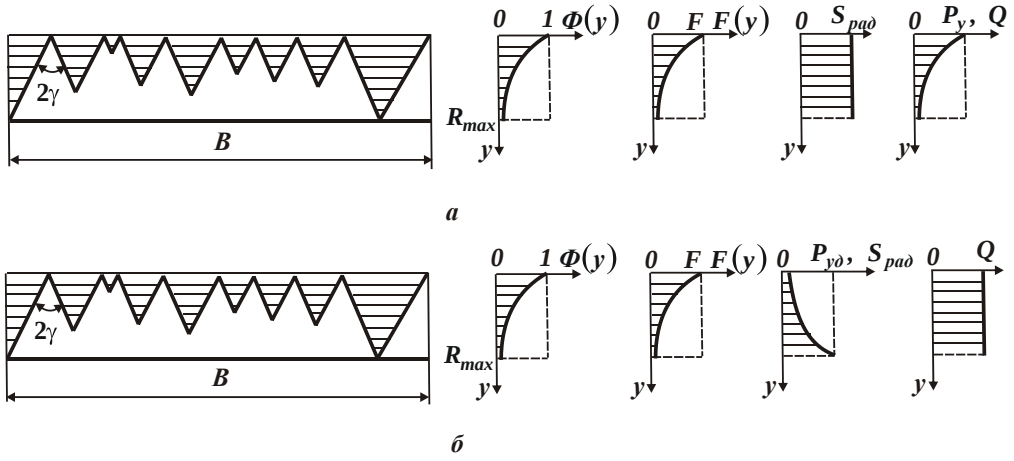


Рис. 1 – Расчетные схемы параметров абразивного полирования: а – при фиксированной скорости радиальной подачи $S_{\text{рад}}$ и б – фиксированным радиальным усилием P_y

Таким образом показано, что за счет осуществления съема металла с переменной во времени скоростью радиальной подачи обеспечивается повышение производительности в начальный момент обработки и уменьшение шероховатости поверхности на конечном этапе обработки. Фактически реализуется оптимальная схема финишной абразивной обработки, соответствующая схеме выхаживания при шлифовании, когда съем металла на окончательном этапе обработки осуществляется без радиальной подачи за счет упруго-восстанавливающей силы, возникающей в технологической системе. В этом случае фактическая скорость радиальной подачи уменьшается во времени от исходного значения практически до нуля, что обеспечивает достижение наилучших показателей шероховатости и точности обрабатываемых поверхностей. По сути, то же происходит и в процессе абразивного полирования с фиксированным радиальным усилием P_y.

Для аналитического описания параметров абразивного полирования следует представить радиальное усилие P_y (радиальную составляющую силы резания) в виде: $P_y = P_z / K_{\text{рез}}$, где P_z – тангенциальная составляющая силы резания; $K_{\text{рез}}$ – коэффициент резания. С учетом известного соотношения [5] $P_z = \sigma \cdot S_{\text{мгн}}$ имеем $P_y = \dfrac{\sigma \cdot S_{\text{мгн}}}{K_{\text{рез}}}$, где σ – условное напряжение резания, Н/м^2; $S_{\text{мгн}} = Q / V_{\text{инстр}}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми работающими зернами, м^2; $Q = F \cdot S_{\text{рад}}$ – производительность обработки, м^3/с; $F = B \cdot H$ – площадь контакта обрабатываемого образца с инструментом, м^2; $V_{\text{инстр}}$ – скорость инструмента, м/с. Тогда

$$P_y = \frac{\sigma \cdot F \cdot S_{\text{рад}}}{K_{\text{рез}} \cdot V_{\text{инстр}}}. \quad (1)$$

Откуда с учетом удельного давления $P_{\text{уд}} = P_y / F$ определяется скорость

$$S_{\text{рад}} = \frac{K_{\text{рез}} \cdot P_y \cdot V_{\text{инстр}}}{\sigma \cdot F} = \frac{K_{\text{рез}} \cdot P_{\text{уд}} \cdot V_{\text{инстр}}}{\sigma}. \quad (2)$$

Из зависимости (2) следует, что при обработке образца с переменной (увеличивающейся во времени) площадью контакта образца с инструментом F, скорость $S_{\text{рад}}$ непрерывно увеличивается. Это согласуется с практикой финишной абразивной обработки [1]. На заключительном этапе абразивного полирования фактическая площадь контакта образца с инструментом F увеличивается до номинальной площади, соответствующей обработке абсолютно гладкой поверхности. Исходя из зависимости (2), это приводит к уменьшению скорости радиальной подачи $S_{\text{рад}}$ и к уменьшению шероховатости поверхности.

Результаты исследований. Определим время абразивного полирования τ с фиксированным радиальным усилием $P_y = const$ при условии, что фактическая площадь контакта обрабатываемого образца с инструментом F по координате y изменяется по закону: $F(y) = H \cdot B(y) = H \cdot \text{tg}\beta \cdot y$, где $B(y) = \text{tg}\beta \cdot y$; β – угол наклона функции $B(y)$. В данном случае для удобства расчетов направление координаты y (рис. 2, а) изменили на противоположное (рис. 2, б).

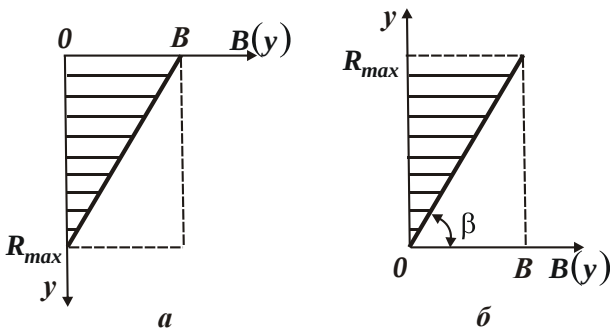


Рис. 2 – Вид функции $B(y)$

Зависимость (2) в этом случае примет вид:

$$S_{\text{рад}} = \frac{K_{\text{рез}} \cdot P_y \cdot V_{\text{инстр}}}{\sigma \cdot H \cdot tg\beta \cdot y}. \quad (3)$$

Время обработки τ с переменной $S_{\text{рад}}$ можно представить в виде суммы значений времени, затрачиваемого на съем единицы толщины обрабатываемого материала Δy: $\tau = \sum_{i=1}^{r} \frac{\Delta y}{S_{\text{рад}_i}}$, где $S_{\text{рад}_i}$ – скорость радиальной подачи в различные моменты времени, м/с. Тогда

$$\tau = \int_0^y \frac{\sigma \cdot H \cdot \text{tg}\beta \cdot y}{K_{\text{рез}} \cdot P_y \cdot V_{\text{инстр}}} \cdot dy = \frac{\sigma \cdot H \cdot \text{tg}\beta \cdot y^2}{2 \cdot K_{\text{рез}} \cdot P_y \cdot V_{\text{инстр}}}; \quad (4)$$

$$S_{\text{рад}} = \sqrt{\frac{K_{\text{рез}} \cdot P_y \cdot V_{\text{инстр}}}{2 \cdot \sigma \cdot H \cdot \text{tg}\beta \cdot \tau}}. \quad (5)$$

Как видно, с течением времени обработки τ скорость радиальной подачи $S_{\text{рад}}$ уменьшается. При этом производительность обработки $Q = F(y) \cdot S_{\text{рад}}$ равна: $Q = \frac{K_{\text{рез}} \cdot P_y \cdot V_{\text{инстр}}}{\sigma}$. Этим показано, что Q не зависит от $S_{\text{рад}}$, а определяется $\sigma / K_{\text{рез}}$, P_y и $V_{\text{инстр}}$, т.е. как и в случае абразивного полирования с постоянной площадью контакта образца с инструментом F.

Выводы. Установлено, что при фиксированном радиальном усилии удельное давление в зоне обработки при абразивном полировании уменьшается вследствие увеличения относительной опорной длины микропрофиля обрабатываемой исходной поверхности. Этим показано, что схема абразивного полирования с фиксированным радиальным усилием является наиболее оптимальной с точки зрения обеспечения условий уменьшения шероховатости при обработке поверхностей со значительной исходной шероховатостью.

Список литературы: 1. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / *Э. В. Рыжов, А. А. Сагарда, В. Б. Ильицкий, И. Х. Чеповецкий*. – К.: Наукова думка, 1979. – 244 с. **2.** *Кедров С. М.* Средства повышения производительности доводки металлов / *С. М. Кедров* // Станки и инструмент, 1987. – №6. – С. 10-13. **3.** *Ваксер Д. Б.* Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании / *Д. Б. Ваксер*. – М.: Машиностроение, 1964. – 123с. **4.** *Новіков Ф.В*. Математична модель визначення шорсткості поверхні при абразивній обробці / *Ф.В. Новіков, В.В. Нежебовський, В.Г. Шкурупій* // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ "ХПІ". − 2013. − № 5 (979). − С. 199-210. **5.** Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / *А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков* и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kachestvo poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke *E.V. Ryzhov, A.A. Sagarda, V.B. Ilitskiy, I.K. Chepovetskiy*. – Kiev: Naukova dumka, 1979. – 244 p. **2.** *Kedrov S.M.* Sredstva povysheniya proizvoditelnosti dovodki metallov *S.M. Kedrov* Stanki i inctrument, 1987. – No6. – P. 10–13. **3.** *Vakser D.B.* Puti povysheniya proizvoditelnosti abrazivnogo instrumenta pri shlifovanii *D.B. Vakser*. – M.: Mashinostroenie, 1964. – 123 p. **4.** *Novikov F.V*. Matematychna model vyznachennya shorstkosti poverkhni pry abrazivniy obrobtsi *F.V. Novikov, V.V. Nezhebovskyi, V.G. Shkurupiy* Visnyk NTU "KhPI". Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Matematechne modeliuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh. – Kharkiv: NTU "KhPI". − 2013. − No 5 (979). − P. 199–210. **5**. Teoretycheskie osnovy rezaniyz i shlifovaniya materialov: ucheb. posobie *A.V. Yakimov, F.V. Novikov, G.V. Novikov* i dr. – Odessa: OGPU, 1999. – 450 p.

Поступила (received) 23.10.2014г.

ЗМІСТ

Алиева Л. И. ,. Шкира А. В, Гончарук К. В.
Деформируемость металла в процессе трехстороннего комбинированного выдавливания….. ***3***

Аргат Р. Г. , Пузырь Р. Г. , Долгих О. Н.
Распределение напряжений на вытяжном ребре матрицы
при вытяжке цилиндрических заготовок……. ***8***

Брижан Т. М., С. А. Дитиненко
Технологическое обеспечение безвибрационной обработки отверстий…… ***13***

Євстратов В. О.
Формування морфологічного ящика як передумова пошуку нових видів
обладнання для оброблення металів тиском…… ***19***

С. В. Ершов, С. Н. Мельник, К. Г. Геймур, Е. А. Кравченко
Экспериментальное и теоретическое исследование
деформированного состояния металла при прокатке швеллера……. ***31***

Забара А. С.
Устройство для определения энергосиловых параметров процесса
формообразования профильных труб…… ***39***

Загорянский В. Г.
Исследование влияния нагрева на упругое пружинение
при пластическом изгибе двухслойных листов…… ***44***

Калюжний О. В., Пахолко А. С.
Силові режими та формозміна металу при відбортуванні отворів у попередньо
зпрофільованій заготовці в матриці з різним радіусом заокруглення…… ***52***

Каргин Б. С., Каргин С. Б.
Исследование методов повышения стойкости штампов горячего деформирования…… ***60***

Кленов О. С., Новиков Ф.В., Крюк А. Г.
Аналитическое определение силы резания и условий ее уменьшения…….. ***64***

Коробко Т. Б., Присяжний А. Г., Святой М. О., Коренко М .Г.
Уточнений метод розрахунку подвоєного опору металу
зрушенню при холодній тонколистовій прокатці…… ***70***

Липчанский А. А.
Исследование влияния вытяжного ребра матрицы
на напряжённо-деформированное состояние при штамповке днищ……. ***76***

Медведев В. С., Базарова Е. В., Шпаков В. А.
Влияние обжатия стенки на изменение высоты фланцев
в черновых закрытых балочных калибрах…… ***81***

Мірзак В. Я., Боков В. М.
Підвищення якості розділового тонколистового штампування……. ***89***

Михалевич В. М. , Добранюк Ю. В. , Матвійчук В. А. , Трач Є. А.
Моделі підсумовування розсіяних пошкоджень в процесах пластичного деформування…….. ***98***

Мороз М. М.
Підвищення ефективності технологічного процесу транспортного обслуговування
м. Кременчук…… ***103***

Музыкин Ю. Д.. Татьков В. В., Путноки А. Ю., Москаленко П. П.
Диагностика технического уровня силовых приводов клетей
листовых станов горячей прокатки…… ***110***

Наумова Е. А., Мосьпан Д. В., Воронин А. В., Драгобецкий В. В.
Корректировка режимов упрочнения пластическим деформированием…….. ***117***

Николенко Р. С.
Влияние геометрических характеристик выпуклых осадочных вставок
на энергосиловые режимы при эксцентричной осадке заготовок различной высоты…… ***122***

Огородников В. А. , Грушко А. В. , Гуцалюк А. В.
Выбор критериев деформируемости при оценке использованного ресурса пластичности
в процессах обработки металлов давлением…… ***127***

Розов Ю. Г.
Развитие методов расчётов и совершенствование конструктивных и технологических
параметров изготовления трубчатых изделий с профилированной внутренней поверхностью. ***137***

Рябенков И.А., Новиков Ф.В.
Оценка влияния интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом
на эффективность процесса шлифования……. ***143***

Сабол С. Ф.
Визначення конструктивних параметрів штампу для холодного видавлювання
вісесиметричних виробів зі ступінчастою порожниною з розтягненням стінки заготовки…… ***148***

Савелов Д. В.
Особенности взаимодействия элементов динамической системы «вибростол –
металлический порошок – пуансон» при двустороннем вибрационном прессовании……. ***152***

Середа Б. П., Белоконь Ю. А., Бабаченко Е. В.
Исследование процесса уплотнения синтезированных интерметаллидных сплавов
при СВС-прессовании……. ***158***

Тараненко М. Е., Клименко О. Н.
Квалиметрия в обработке листовых деталей давлением…….. ***164***

Третьяк В. В. , Савченко Н. Ф., Дитиненко С. А., Онопченко А. В. , Федорова А. Ф.
Возможности программного комплекса классификации листовых деталей
для анализа технологичности листовых деталей……. ***170***

Тришевський О. І., Салтавець М. В.
Математичне моделювання елементів нових технологічних процесів прокатки……. ***175***

Хоменко О. І. , Баглюк Г. А.
Моделювання ущільнення конічної порошкової заготовки в закритій жорсткій матриці……... ***184***

Шкурупий В. Г., Новиков Ф. В., Крюк А. Г.
Разработка математической модели определения параметров шероховатости обработки
при абразивном полировании…… ***192***

РЕФЕРАТИ

УДК 621.777.01

Деформируемость металла в процессе трехстороннего комбинированного выдавливания / Л. И. Алиева, А. В. Шкира, К. В. Гончарук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 3–7. Бібліогр.: 5 назв.

Розглянутий процес комбінованого тристороннього видавлювання пустотілої деталі. Моделювання проводилося з метою визначення граничної формозміни в умовах холодного деформування заготівки з алюмінієвого сплаву АД31. Проаналізовано напружено-деформований стан з умовою впливу основних технологічних параметрів. Встановлена найбільш небезпечна зона, де буде спостерігатися руйнування деталі та визначено значення критичної степені деформації.

Ключові слова: комбіноване видавлювання, ресурс пластичності, фланець, руйнування.

УДК 621.7.044

Распределение напряжений на вытяжном ребре матрицы при вытяжке цилиндрических заготовок / Р. Г. Аргат, Р. Г. Пузырь, О. Н. Долгих // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 8–13. Бібліогр.: 6 назв.

У статті наведено результати теоретичного аналізу процесу витяжки циліндричних деталей з листового металу, що враховують вплив технологічних і геометричних параметрів процесу на розподіл небезпечних розтягуючих напружень на витяжному ребрі матриці. Розглянуто рівновагу тороидальной оболонки без урахування впливу дотичних напружень. Одержано залежність для розрахунку величини розтягуючих напружень на витяжною кромці матриці, яка дозволяє враховувати вплив коефіцієнта витяжки, кута охоплення витяжною кромки матриці матеріалом заготовки, товщини останньою і радіуса заокруглення матриці.

Ключові слова: витяг, листова заготовка, деформація, пластичність, діаметр, радіус, рівновага.

УДК 621.923

Технологическое обеспечение безвибрационной обработки отверстий / Т.М. Брижан, С.А. Дитиненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 13–19. Бібліогр.: 5 назв.

Аналітично визначені параметри зрізів при обробці отворів розгортками з похилими зубами й умови безвібраційної обробки, які засновані на дотриманні певних співвідношень між кутом нахилу зубів розгортки, їхньою довжиною й кількістю. Доведено можливість істотного збільшення фактичного переднього кута зуба розгортки за рахунок збільшення його кута нахилу, що сприяє зниженню силової напруженості процесу різання, особливо радіальної складової сили різання, яка при зніманні нерівномірного припуску визначає інтенсивність коливань у технологічній системі, а відповідно точність обробки отвору.

Ключові слова: розгортання отвору, безвібраційна обробка, інтенсивність коливань, технологічна система, оброблюваний матеріал, товщина зрізу.

УДК 621.73

Формування морфологічного ящика як передумова пошуку нових видів обладнання для оброблення металів тиском / В. О. Євстратов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 19–31. Бібліогр.: 5 назв.

Запропоновано новий підхід до класифікації обладнання для оброблення металів тиском. Особливість підходу – створення морфологічного ящика (таблиці) з 11-ма осями. У таблиці наведено 8 конструкторських класифікаційних ознак та 3 технологічні. Таблиця містить усі уявні варіанти конструкцій обладнання та їхнього технологічного застосування, які охоплені класифікаційними ознаками, що прийняті для класифікації. Запропоновано нові терміни та дані їхні тлумачення: заготованка, покованка, штампованка, корба. Така детальна класифікація може стати основою для генерування нових конструкцій обладнання з використанням сучасних ІТ-технологій.

Ключові слова: морфологічний ящик, класифікаційна ознака, заготованка, покованка, штампованка, корба, колінчастий вал, ексцентриковий вал, кривошипний вал, кратність дії.

УДК 621.771.01

Экспериментальное и теоретическое исследование деформированного состояния металла при прокатке швеллера / С. В. Ершов, С. Н. Мельник, К. Г. Геймур, Е. А. Кравченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 31–39. Бібліогр.: 12 назв.

Не дивлячись на розповсюдження швелерів і велику кількість експериментальних досліджень, закономірності поведінки металу при прокатуванні в калібрах швелерної форми недостатньо вивчені. В статті викладені результати зіставлення даних експериментального і теоретичного дослідження деформованого стану швелеру при прокатуванні в 9 кліті середньосортного стану 350 ПАТ «ДМКД». Були розглянуті і проаналізовані формозміна металу в різних перерізах розкату – на вході в осередок деформації, під час сталого процесу прокатки і на виході з валків. Зроблені висновки про наявність значної нерівномірності розподілення поширення і витяжки в осередку деформування, встановлені закономірності їх розподілення..

Ключові слова: деформація, фланцеві профілі, швелер, калібр, плин металу.

УДК.621.771.63

Устройство для определения энергосиловых параметров процесса формообразования профильных труб /А. С. Забара // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 39–44. Бібліогр.: 5 назви.

Наведено пристрій, що дозволяє визначити енергосилові параметри процесу і деформований стан металу при формоутворенні профільних труб. Отримувані результати забезпечують оцінку основних технологічних параметрів процесу формоутворення і міцності проектованого технологічного обладнання. Пристрій доцільно використовувати для експериментальних досліджень різних технологічних процесів виробництва гнутих профілів.

Ключові слова: профільна труба, пристрій, формоутворення, енергосилові параметри процесу.

УДК 621.981:669.14

Исследование влияния нагрева на упругое пружинение при пластическом изгибе двухслойных листов / В. Г. Загорянский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 44–51. Бібліогр.: 13 назв.

Стаття присвячена теоретичному аналізу та експериментальному дослідженню впливу нагрівання при гнутті двошарових листів на їхнє пружне пружинення. У статті розроблені розрахункові залежності для визначення пружного пружинення при нагріванні двошарових листів (смуг) при гнутті. Встановлено, що на зміну кривизни листа внаслідок пружинення температура нагрівання впливає через зміну значень модуля пружності та констант кривої зміцнення. Для двошарових листів корозійностійкого біметалу 09Г2С + 12Х18Н10Т встановлені залежності кута пружинення від температури нагріву двошарових листів під гнуття плакуючим шаром назовні та всередину та визначені оптимальні температури нагрівання.

Ключові слова: пластичний згин, двошаровий лист, момент, що вигинає, пружне пружинення, вплив нагріву.

УДК 621.983

Силові режими та формозміна металу при відбортуванні отворів у попередньо зпрофільованій заготовці в матриці з різним радіусом заокруглення / О.В. Калюжний, А. С. Пахолко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 51–59. Бібліогр.: 7 назв.

Приведені результати розрахунків методом скінченних елементів холодного відбортування отворів сферичним пуансоном у попередньо зпрофільованій заготовці із маловуглецевої сталі та алюмінію. Встановлено вплив радіусу заокруглення матриці на зусилля відбортування, форму і розміри здеформованих заготовок та напружено-деформований стан в них. Розрахований ступінь використання ресурсу пластичності здеформованого металу. Збільшення радіусу заокруглення матриці приводить до зменшення зусилля деформування та зростання висоти відбортованої частини заготовки. Моделюванням отримані необхідні розрахункові дані, які підтверджені експериментально

Ключові слова: відбортування отворів, зпрофільована заготовка, радіус заокруглення матриці, сферичний пуансон, метод скінченних елементів, зусилля відбортування, форма і розміри, напружено-деформований стан заготовок.

УДК 621.73

Исследование методов повышения стойкости штампов горячего деформирования / Б. С. Каргин, С. Б. Каргин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 59–64. Бібліогр.: 4 назв.

Представлені результати комплексних досліджень з підвищення стійкості штампів при гарячої об'ємної штампування сталі. Розглянуто основні причини виходу штампів з ладу, вплив азотування, марки сталі і типу технологічного мастила (ТС) на стійкість штампів. Стійкість штампів великою мірою визначається структурою і властивостями поверхневих шарів, які зазнають найбільш відчутних змін в процесі експлуатації. Дано опис установки для автоматизованого нанесення ТЗ на гравюру штампа. На підставі виробничих дослідженьвстановлені ефективні методи підвищення стійкості штампів при гарячої об'ємної штампування.

Ключові слова: штамп, мастило, стійкість, прес, установка, гравюра, графіт.

УДК 621.923

Аналитическое определение силы резания и условий ее уменьшения / О. С. Кленов, Ф.В. Новиков, А.Г. Крюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 64–69. Бібліогр.: 5 назв.

У роботі розглянуті різні теоретичні підходи до визначення сили різання лезовим інструментом. Показано, що в остаточному підсумку вони зводяться до єдиного рішення, з якого визначені основні умови зменшення сили різання, що полягають в зменшенні різниці умовного кута тертя на передній поверхні інструмента й переднього кута інструмента. Показано також, що у випадку збільшення різниці цих кутів до значення, рівного 90^0, сила різання необмежено збільшується. Це свідчить про високу силову напруженість процесу шліфування, який характеризується значними негативними передніми кутами ріжучих зерен. Установлено, що при різанні лезовими інструментами тангенціальна складова сили різання більше радіальної складової сили різання, а при шліфуванні, навпаки, менше.

Ключові слова: процес різання, лезовий інструмент, різець, оброблюваний матеріал, стружка, сила різання, дотичне напруження

УДК 621.77.014

Уточнений метод розрахунку подвоєного опору металу зрушенню при холодній тонколистовій прокатці / Коробко Т.Б. Присяжний А.Г., Святий М.О., Коренко М.Г. // // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 69–75. Бібліогр.: 8 назв.

У статті проаналізовані математичні моделі напруження текучості і подвоєного опору металу зрушенню при холодній тонколистовій прокатці. На основі виконаного аналізу показана доцільність обліку у вказаних моделях впливу температурно-швидкісних умов процесу деформації. Вдосконалена авторами статті числова математична модель дозволила уточнити розрахунок подвоєного опору металу зрушенню з врахуванням температури і швидкості холодної тонколистової прокатки, а також реального характеру розподілу по довжині осередку деформації геометричних параметрів і показників зовнішнього контактного тертя.

Ключові слова: холодна прокатка, напруження плинності, подвоєний опір зрушенню, температурно-швидкісні умови, осередок деформації, математичне моделювання.

УДК 621.73.02

Исследование влияния матрицы с вытяжным ребром на напряженно-деформированное состояние при штамповке днищ / А.А. Липчанский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 75–80. Бібліогр.: 7 назв.

Представлені результати дослідження напружено-деформованного стану при витяжці днищ в матриці з витяжним ребром. Використаний пакет кінцево-елементного аналізу деформ – 2D. Встановлено розподіл логарифмічної деформації, інтенсивність деформації та інтенсивності напруги у заготовці при витяжці з притиском. Відзначено, що запропонована методика розрахунку гарячого листового штампування днищ дозволяє більш достовірно прогнозувати появу ознак браку при проектуванні технологічних операцій листового штампування.

Ключові слова: моделювання, напружено-деформований стан, заготовка, матриця, витяжне ребро.

УДК 621.771.26.001

Влияние обжатия стенки на изменение высоты фланцев в черновых закрытых балочных калибрах / В.С. Медведев, Е.В. Базарова, В.А. Шпаков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 80–88. Бібліогр.: 10 назв.

Наведено результати математичного моделювання течії металу в чорновому закритому балочному калібрі методом кінцевих елементів. Показано розподіл напружень, переміщень і деформацій у поперечному перерізі прокатуваного профілю. Визначено інтегральні параметри формозміни. Встановлено, що з підвищенням обтиску стінки загальна висота полиць зменшується. Висота відкритих і закритих фланців збільшується. Інтенсивність росту прирощення висоти закритих фланців менше, ніж відкритих. Для отримання двотаврових профілів з високими фланцями прокатку необхідно вести з інтенсивною деформацією стінки в чорнових калібрах.

Ключові слова: балочний калібр, математична модель, деформація металу, прирощення фланців.

УДК 621.98.04

Підвищення якості розділового тонколистового штампування / В. Я. Мірзак, В. М. Боков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 88–97. Бібліогр.: 8 назв.

Експериментально доведено, що при штампуванні пластин ротора встановлення штампа на механічний компенсатор похибок системи «прес-штамп», порівняно із встановленням його без компенсатора, суттєво підвищує якість штампування, зокрема висота задирки зменшується за зовнішнім контуром на 93 % та за внутрішнім – на 45 %. Отриманий результат підтверджує доцільність використання механічних компенсаторів похибок системи «прес-штамп» з метою підвищення якості розділового тонколистового штампування.

Ключові слова: механічний компенсатор, якість розділового тонколистового штампування, величина задирки, джерело похибок, пластини ротора, динамічне підстроювання.

УДК 519.2

Моделі підсумовування розсіяних пошкоджень в процесах пластичного деформування / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, В. А. Матвійчук, Є. А. Трач // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 97–102. Бібліогр.: 17 назв.

В даній роботі проаналізовано ключові аспекти моделей підсумовування пошкоджень та їх формалізація для розв’язання задач тривалої міцності та деформівності. Показано широке використання теорії деформівності в численних закордонних працях та здійснено аналіз використовуваної термінології ключових понять. Відзначено переваги застосування теорії деформівності, що базується на виборі певної моделі підсумовування пошкоджень у порівнянні з моделями руйнування, що вбудовані в сучасні програмні комплекси.

Ключові слова: граничні пластичні деформації, показник напруженого стану, моделі підсумовування пошкоджень, циліндрична заготовка, осадження.

УДК 656.132

Підвищення ефективності технологічного процесу транспортного обслуговування м. Кременчук / М.М. Мороз // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 103–109.

Приведено методи та результати соціалогічно-транспортного опитування населення м. Кременчук. Отримані дані дозволяють прогнозувати транспортну рухомість населення для формування відповідних організаційно-економічних рішень та забезпечення на цій основі високої ефективності і якості пасажирських перевезень. Результати обстеження пасажиропотоків та соціологічного транспортного опитування населення міста дозволяють запровадити заходи щодо підвищення ефективності роботи пасажирського транспорту загального користування.

Ключові слова: соціологічні дослідження, пасажирський транспорт, транспортне обслуговування.

УДК 621.771

Диагностика технического уровня силовых приводов клетей листовых станов горячей прокатки / Ю.Д. Музикін, В.В. Татьков, А.Ю. Путнока, П.П. Москаленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 110–116. Бібліогр.: 7 назв.

Розглянуто особливості експлуатації машин і агрегатів в умовах сучасного виробництва. Новим напрямком при розробці виробів з високими експлуатаційними характеристиками є отримання наноструктурних композиційних матеріалів і матеріалів з перетвореною упорядкованою структурою. Деформаційна нестійкість виникає при деформаціях рівних граничним рівномірним. Запропоновано методи теоретичного визначення граничних рівномірних деформацій, що дозволяє оптимізувати процеси зміцнення пластичним деформування, калібрування і формозміни деталей з елементами жорсткості.

Ключові слова: діагностика, силові приводи, кінематичні пари, зазор, моніторинг, лазерний прилад.

УДК 539.411.001.24

Корректировка режимов упрочнения пластическим деформированием / Е. А. Наумова, Д. В. Мосьпан, А. В. Воронин, В. В. Драгобецкий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та

обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 116–121. Бібліогр.: 4 назв.

Розглянуто особливості експлуатації машин і агрегатів в умовах сучасного виробництва. Новим напрямком при розробці виробів з високими експлуатаційними характеристиками є отримання наноструктурних композиційних матеріалів та матеріалів з перетвореною упорядкованою структурою. Деформаційна нестійкість виникає при деформаціях рівних граничним рівномірним. Запропоновано методи теоретичного визначення граничних рівномірних деформацій, що дозволяє оптимізувати процеси зміцнення пластичним деформування, калібрування і формозміни деталей з елементами жорсткості.

Ключові слова: зміцнення, пластична деформація, стійкість, структура.

УДК 621.73

Влияние геометрических характеристик выпуклых осадочних вставок на энергосиловые режимы при эксцентричной осадке заготовок различной высоты / Николенко Р.С. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 122–127. Бібліогр.: 9 назв.

Выполнено моделирование методом конечных элементов (МКЭ) процесса эксцентричной осадки выпуклыми вставками при фиксированном значении эксцентриситета вертикальных осей заготовки и инструмента. Получены графические зависимости силы осадки заготовки от степени обжатия, геометрических характеристик деформирующего инструмента и деформируемой заготовки при различных величинах эксцентриситета.

Ключевые слова: заготовка, профилирование, выпуклые вставки, эксцентриситет, усилие.

УДК 621.7.011

Выбор критериев деформируемости при оценке использованного ресурса пластичности в процессах обработки металлов давлением / В. А. Огородников, А. В. Грушко, А. В. Гуцалюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 127–136. Бібліогр.: 6 назв.

У статті наведено результати досліджень пластичності металів при об'ємному напруженому стані. Оброблені експериментальні дані про вплив гідростатичного тиску і його зміни на пластичність металів. Показано вплив інваріантів тензора напружень на пластичність. При цьому процес навантажування зразків розглядається в просторі трьох безрозмірних інваріантних характеристик напружено-деформованого стану. Показано, що на пластичність впливає перша і друга похідна від показників напруженого стану. Показано також, що критерії деформируемости, засновані на лінійній теорії накопичення пошкоджень, дають істотне відхилення між результатами розрахунку і експериментом.

Ключові слова: критерій, кривизна шляху деформування, ресурс пластичності, траєкторія деформування.

УДК 621.77.01

Развитие методов расчётов и совершенствование конструктивных и технологических параметров изготовления трубчатых изделий с профилированной внутренней поверхностью / Ю.Г. Розов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 137–143. Бібліогр.: 6 назв.

У роботі запропонований та реалізований спосіб здобуття довгомірної трубчастої заготівки (ствольної заготівки) з короткої заготівки методом гідроекструзії на рухливій гладкій оправці в середовищі високого гідростатичного тиску. Запропоновані нові технології здобуття прецизійної товстостінної трубчастої заготівки з внутрішніми гвинтовими канавками на прикладі виготовлення нарізного ствола з полігональним профілем, що містять двопрохідний процес, пресування. Вперше розроблена методика визначення НДС стволів стрілецької зброї з нарізною внутрішньою поверхнею різної форми.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, метод кінцевих елементів, оправка, гідроекструзія, гідростатичний тиск, обтискання, волочіння, конічна матриця, подовжня стійкість, міцність.

УДК 621.923

Оценка влияния интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом на эффективность процесса шлифования / И.А. Рябенков, Ф.В. Новиков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 143–148. Бібліогр.: 5 назв.

У роботі отримані аналітичні залежності для визначення тангенціальної й радіальної складових сили різання на основі роздільного урахування енергій “чистого” різання й тертя в загальному енергетичному балансі процесу шліфування. Теоретично встановлено, що із часом обробки у зв'язку з інтенсивним тертям у зоні різання й збільшенням пружних переміщень у технологічній системі сила різання збільшується. Проведено теоретичний аналіз відношення тангенціальної й радіальної складових сили різання й показана можливість його збільшення з метою підвищення ефективності шліфування шляхом підтримки в процесі високої ріжучої здатності круга.

Ключові слова: шліфування, різання, тертя, шліфувальний круг, сила різання, пружне переміщення, технологічна система, швидкість деталі.

УДК 621.777.4

Визначення конструктивних параметрів штампу для холодного видавлювання вісесиметричних виробів зі ступінчастою порожниною з розтягненням стінки заготовки/ С.Ф.Сабол // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 148–152. Бібліогр.: 4 назви.

Приведено схему конструкції штампу для холодного видавлювання порожнистих вісесиметричних виробів зі ступінчастою порожниною з розтягненням стінки заготовки. На основі використання закону збереження обєму, здійснено розрахунки конструктивних розмірів штампу:розміри верхньої та нижньої порожнини контейнера, розміри регулювального кільця, використання якого дає змогу змінювати швидкість переміщення контейнера у відповідності до зміни швидкості металлу стінки заготовки, в процесі деформування, що забезпечує постійне зщеплення каналу контейнера з буртом стінки заготовки що видавлюється .

Ключові слова: холодне видавлювання, вісесиметричні вироби, ступінчаста циліндрична порожнина, розтягнення, штамп для видавлювання.

УДК 621.762.4

Особенности взаимодействия элементов динамической системы «вибростол – металлический порошок – пуансон» при двустороннем вибрационном прессовании / Д.В. Савелов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 152–158. Бібліогр.: 5 назв.

Представлена математична модель динамічної системи «вібростіл – металевий порошок – пуансон», в якій металевий порошок представлений у вигляді системи з розподіленими параметрами. Отримано теоретичні вирази, що описують поведінку динамічної системи в робочому режимі: закономірності руху і амплітуди коливань вібростола і пуансона, які враховують напрями і співвідношення амплітуд збуджуючих сил і кутові частоти вимушених коливань.

Ключові слова: математична модель, динамічна система, металевий порошок, вібростіл, пуансон, амплітуда збуджуючі сили.

УДК 621.777.01

Исследование процесса уплотнения синтезированных интерметаллидных сплавов при СВС-прессования / Б.П. Середа, Ю.А. Белоконь, Е.В. Бабаченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 158–164. Бібліогр.: 5 назв.

В роботі розглянуті питання, пов'язані безпосередньо з отриманням інтерметаллідних сплавів в режимі теплового вибуху, включаючи важливе питання переходу від самозаймання до ущільнення синтезованого продукту і отримання кінцевого продукту. В експериментах по визначенню залежності загальної пористості зразків з γ-TiAl сплаву від часу витримки під тиском варіювали як марки порошку титану, значною мірою визначають температуру пористої заготовки після проходження по ній хвилі горіння. Кристалізація продукту починається спочатку в тих областях розплаву, які збагачені більш тугоплавким компонентом. У зоні догорання відбувається донасищеніе твердого продукту алюмінієм. Встановлено, що зміна пористості інтерметаллідних сплавів при СВС-пресуванні в значній мірі залежать від температури початку пресування, обумовленою температурою синтезу складу і часу витримки при тиску.

Ключеві слова: синтез, інтерметаліди, СВС-пресування, ущільнення, пористість

УДК 621.075.8

Квалиметрия в обработке листовых деталей давлением / М.Е. Тараненко, О.Н. Клименко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 164–170. Бібліогр.: 5 назв.

Запропоновано метод оцінювання якості листових деталей на етапах підготовки виробництва, а також функціональні залежності показників якості від геометричних розмірів деталей. Це дозволяє обирати показники якості на етапі проектування. Розглядається показник технологічності деталей як комплексний. У якості складових часткових показників кількісно аналізуються властивості: форма деталі, її глибина та деяких локальних елементів (радіус сполучення бортів). Для етапу виготовлення обрано ієрархічну сукупність властивостей для оцінювання якості продукції, що виробляється.

Ключові слова: якість, листові деталі, кваліметрія, дослідні та статистичні дані, ієрархічна сукупність властивостей.

УДК 621.7.044:658.512.011.56

Возможности программного комплекса классификации листовых деталей для анализа технологичности листовых деталей / В. В. Третьяк, Н. Ф. Савченко, А. В. Онопченко, А. Ф. Федорова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 170–175. Бібліогр.: 4 назви.

Представлені можливості програмного комплексу класифікації листових деталей для аналізу технологічності листовых деталей. Виявлені особливості використовування імпульсних технологій для виготовлення складних листових деталей для аерокосмічного комплексу. Наведена загальна схема використовування оснащення і устаткування для імпульсної технологи варіанти різного навантаження заготівки імпульсними джерелами енергії. Запропонована схема обробки інформації інтерактивним програмним комплексом. Представлений перелік меню програмного комплексу і рекомендації по його використовуванню.

Ключові слова: інтерактивний програмний комплекс, імпульсні технології, об'єктний підхід до проектування імпульсних технологій.

УДК 628.16:621.981.3

Математичне моделювання елементів нових технологічних процесів прокатки / О. І. Тришевський, М. В. Салтавець // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 175–183. Бібліогр.: 5 назви.

Викладені результати теоретичних досліджень моделювання теплового стану смуги з використанням надшвидкісного охолодження (UFC) для підвищення ефективності процесів прокатки тонкого листа. Отримані дані зіставлені з результатами експериментальних досліджень французьких дослідників. Реконструкція теплового поля цих досліджень показала неможливість використання ці результати для проектування реальних процесів прокатки, у зв'язку з чим рекомендовано користуватися розробленою авторами методикою математичного моделювання.

Ключові слова: гаряча прокатка, полоса, математична модель, тепловий стан, зверхшвідкісне охолодження.

УДК 621.762

Моделювання ущільнення конічної порошкової заготовки в закритій жорсткій матриці / О.І. Хоменко, Г.А. Баглюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 184–191. Бібліогр.: 2 назви.

Розглянуто математичну модель однобічного ущільнення конічної заготовки двома пуансонами в закритій жорсткій матриці в припущенні наявності радіальної складової плину матеріалу у циліндричних (технологічних) частинах матриці. Описано методику комп'ютерного моделювання процесу при ущільненні окремо верхнім та нижнім пуансонами. З'ясовано, що комп'ютерне моделювання у порівнянні з натурним призводить до якісно подібної картини розподілу пористості. Деякі кількісні відхилення можна пояснити як припущеннями при моделюванні, так і похибками експерименту.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, порошковий матеріал, ущільнення, матриця, пуансон.

УДК 621.923

Разработка математической модели определения параметров шероховатости обработки при абразивном полировании / В.Г. Шкурупий, Ф.В. Новиков, А.Г. Крюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 192–196. Бібліогр.: 5 назв.

Доведено, що при фіксованому радіальному зусиллі питомий тиск у зоні обробки у процесі абразивного полірування зменшується внаслідок збільшення відносної опорної довжини мікропрофілю оброблюваної вихідної поверхні. У результаті зменшується фактична швидкість радіальної подачі, що відповідає схемі виходжування при шліфуванні. Цим показано, що схема абразивного полірування з фіксованим радіальним зусиллям є найбільш оптимальною з погляду забезпечення умов зменшення шорсткості при обробці поверхонь зі значною вихідною шорсткістю, яка утворюється на попередніх операціях.

Ключові слова: абразивне полірування, шорсткість поверхні, радіальне зусилля, швидкість радіальної подачі, схема виходжування.

РЕФЕРАТЫ

УДК 621.777.01

Деформируемость металла в процессе трехстороннего комбинированного выдавливания / Л. И. Алиева, А. В. Шкира, К. В. Гончарук //// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 3–7. Бібліогр.: 5 назв.

Рассмотрен процесс комбинированного трехстороннего выдавливания полой детали. Моделирование проводилось с целью определения предельного формоизменения в условиях холодного деформирования заготовок из алюминиевого сплава АД31. Проанализировано напряжённо-деформированное состояние с учетом влияния основных технологических параметров. Установлена наиболее опасная зона, где будет наблюдаться разрушение детали, и определено значение критической степени деформации.

Ключевые слова: комбинированное выдавливание, ресурс пластичности, фланец, разрушение.

УДК 621.7.044

Распределение напряжений на вытяжном ребре матрицы при вытяжке цилиндрических заготовок / Р. Г. Аргат, Р. Г. Пузырь, О. Н. Долгих // // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 8–13. Бібліогр.: 6 назв.

В статье приведены результаты теоретического анализа процесса вытяжки цилиндрических деталей из листового металла, учитывающие влияние технологических и геометрических параметров процесса на распределение опасных растягивающих напряжений на вытяжном ребре матрицы. Рассмотрено равновесие тороидальной оболочки без учета влияния касательных напряжений. Получена зависимость для расчета величины растягивающих напряжений на вытяжной кромке матрицы, которая позволяет учитывать влияние коэффициента вытяжки, угла охвата вытяжной кромки матрицы материалом заготовки, толщины последней и радиуса закругления матрицы.

Ключевые слова: вытяжка, листовая заготовка, деформация, пластичность, диаметр, радиус, равновесие.

УДК 621.923

Технологическое обеспечение безвибрационной обработки отверстий / Т.М. Брижан, С.А. Дитиненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 13–19. Бібліогр.: 5 назв.

Аналитически определены параметры срезов при обработке отверстий развертками с наклонными зубьями и условия безвибрационной обработки, основанные на соблюдении определенных соотношений между углом наклона зубьев развертки, их длиной и количеством. Доказана возможность существенного увеличения фактического переднего угла зуба развертки за счет увеличения его угла наклона, что способствует снижению силовой напряженности процесса резания, в особенности радиальной составляющей силы резания, которая при съеме неравномерного припуска определяет интенсивность колебаний в технологической системе, а соответственно точность обработки отверстия.

Ключевые слова: развертывание отверстия, безвибрационная обработка, интенсивность колебаний, технологическая система, обрабатываемый материал, толщина среза.

УДК 621.73

Форормирование морфологического ящика как предпосылка поиска новых видов оборудования для обработки металлов давлением / В. А. Евстратов /// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 19–31. Бібліогр.: 5 назв.

Предложен новый подход к классификации оборудования для обработки металлов давлением. Особенность подхода – создание морфологического ящика (таблицы) с 11-ю осями. В таблице приведено 8 конструкторских классификационных признаков и 3 технологических. Таблица содержит все возможные варианты конструкций оборудования и их технологічного применения, охватываемые принятыми классификационными признаками. Предложены новые термины и их толкование: заготовка, поковка, штамповка, корба. Такая детальная классификация может стать основой для генерирования новых конструкций оборудования с использованием современных IT-технологий.

Ключевые слова: морфологический ящик, классификационный признак, заготовка, поковка, штамповка, корба, коленчатый вал, эксцентриковый вал, кривошипный вал, кратность действия.

УДК 621.771.01

Экспериментальное и теоретическое исследование деформированного состояния металла при прокатке швеллера / С. В. Ершов, С. Н. Мельник, К. Г. Геймур, Е. А. Кравченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 31–39. Бібліогр.: 12 назв.

Несмотря на распространение швеллеров и большое количество экспериментальных исследований, закономерности поведения металла при прокатке в калибрах швеллерной формы изучены недостаточно. В статье изложены результаты сопоставления данных экспериментального и теоретического исследования деформированного состояния швеллера при прокатке в 9 клети среднесортного стана 350 ПАО «ДМКД». Было рассмотрено и проанализировано формоизменение металла в различных сечениях раската – на входе в очаг деформации, во время установившегося процесса прокатки и на выходе из валков. Сделаны выводы о наличие

значительной неравномерности распределения уширения и вытяжки в очаге деформации, установлены закономерности их распределения.

Ключевые слова: деформация, фланцевые профили, швеллер, калибр, течение металла.

УДК.621.771.63

Устройство для определения энергосиловых параметров процесса формообразования профильных труб /А. С. Забара // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 39–44. Бібліогр.: 4 назви.

Приведено устройство, позволяющее определить энергосиловые параметры процесса и деформированное состояние металла при формообразовании профильных труб. Получаемые результаты обеспечивают оценку основных технологических параметров процесса формообразования и прочностных характеристик проектируемого технологического оборудования. Устройство целесообразно использовать для экспериментальных исследований различных технологических процессов производства гнутых профилей.

Ключевые слова: профильная труба, устройство, формообразование, энергосиловые параметры процесса.

УДК 621.981:669.14

Исследование влияния нагрева на упругое пружинение при пластическом изгибе двухслойных листов / В. Г. Загорянский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 44–51. Бібліогр.: 13 назв.

Статья посвящена теоретическому анализу и экспериментальному исследованию влияния нагрева при гибке двухслойных листов на их упругое пружинение. В статье разработаны расчетные зависимости для определения упругого пружинения при нагреве двухслойных листов (полос) при гибке. Установлено, что на изменение кривизны листа вследствие пружинения температура нагрева влияет через изменение значений модуля упругости и констант кривой упрочнения. Для двухслойных листов коррозионностойкого биметалла 09Г2С + 12Х18Н10Т установлены зависимости угла пружинения от температуры нагрева двухслойных листов под гибку плакирующим слоем наружу и внутрь и определены оптимальные температуры нагрева.

Ключевые слова: пластический изгиб, двухслойный лист, изгибающий момент, упругое пружинение, влияние нагрева.

УДК 621.983

Силовые режимы и формоизменение металла при отбортовке отверстий в предварительно спрофилированной заготовке в матрице с различным радиусом закругления / А.В. Калюжный, А.С. Пахолко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 51–59. Бібліогр.: 7 назв.

Приведены результаты расчетов методом конечных элементов холодного видбортування отверстий сферическим пуансоном в предварительно профилированного заготовке с малоуглеродистой стали и алюминия. Установлено влияние радиуса закругления матрицы на усилия видбортування, форму и размеры деформированный заготовок и напряженно-деформированное состояние в них. Рассчитан степень использования ресурса пластичности деформированного металла. Увеличение радиуса закругления матрицы приводит к уменьшению усилия деформирования и рост высоты отбортованной части заготовки. Моделированием получены необходимые расчетные данные, которые подтверждены экспериментально.

Ключевые слова: отбортовка отверстий, спрофилированная заготовка, радиус закругления матрицы, сферический пуансон, метод конечных элементов, усилия отбортовки, форма и размеры, напряженно-деформированное состояние заготовок.

УДК 621.73

Исследование методов повышения стойкости штампов горячего деформирования / Б. С. Каргин, С. Б. Каргин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 59–64. Бібліогр.: 4 назв.

Представлены результаты комплексных исследований по повышению стойкости штампов при горячей объёмной штамповке стали. Рассмотрены основные причины выхода штампов из строя, влияние азотирования, марки стали и типа технологической смазки (ТС) на стойкость штампов. Стойкость штампов в большой мере определяется структурой и свойствами поверхностных слоёв, которые претерпевают наиболее ощутимые изменения в процессе эксплуатации. Дано описание установки для автоматизированного нанесения ТС на гравюру штампа. На основании производственных исследований установлены эффективные методы повышения стойкости штампов при горячей объёмной штамповке.

Ключевые слова: штамп, смазка, стойкость, пресс, установка, гравюра, графит

УДК 621.923

Аналитическое определение силы резания и условий ее уменьшения / О. С. Кленов, Ф.В. Новиков, А.Г. Крюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 64–69. Бібліогр.: 5 назв.

В работе рассмотрены различные теоретические подходы к определению силы резания лезвийным инструментом. Показано, что в конечном итоге они сводятся к единому решению, из которого определены основные условия уменьшения силы резания, состоящие в уменьшении разности условного угла трения на передней поверхности инструмента и переднего угла инструмента. Показано также, что в случае увеличения разности этих углов до значения, равного 90^0, сила резания неограниченно увеличивается. Это свидетельствует о высокой силовой напряженности процесса шлифования, характеризующегося значительными отрицательными передними углами режущих зерен. Установлено, что при резании лезвийными инструментами тангенциальная составляющая силы резания больше радиальной составляющей силы резания, а при шлифовании, наоборот, меньше.

Ключевые слова: процесс резания, лезвийный инструмент, резец, обрабатываемый материал, стружка, сила резания, касательное напряжение

УДК 621.77.014

Уточненный метод расчета удвоенного сопротивления металла сдвигу при холодной тонколистовой прокатке / Т.Б. Коробко, А.Г. Присяжний, М.О. Святой, М.Г. Коренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 69–75. Бібліогр.: 8 назв.

В статье проанализированы математические модели удвоенного сопротивления металла сдвигу при холодной тонколистовой прокатке. На основе выполненного анализа показана целесообразность учета в указанных моделях влияния температурно-скоростных условий процесса деформации. Усовершенствованная авторами статьи численная математическая модель позволила уточнить расчет удвоенного сопротивления металла сдвигу с учетом температуры и скорости холодной тонколистовой прокатки, а также реального характера распределений по длине очага деформации его геометрических параметров и показателей внешнего контактного трения.

Ключевые слова: холодная прокатка, напряжение текучести, удвоенное сопротивление сдвигу, температурно-скоростные условия, очаг деформации, математическое моделирование.

УДК 621.73.02

Исследование влияния матрицы с вытяжным ребром на напряженно-деформированное состояние при штамповке днищ / А.А. Липчанский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 75–80. Бібліогр.: 7 назв.

Представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния при вытяжке днищ в матрице с вытяжным ребром. Использован пакет конечно-элементного анализа DeForm-2D. Установлено распределение логарифмической деформации, интенсивность деформации и интенсивности напряжения в заготовке при вытяжке с прижимом. Отмечено, что предлагаемая методика расчета горячей листовой штамповки днищ позволяет более достоверно прогнозировать появление признаков брака при проектировании технологических операций листовой штамповки.

Ключевые слова: моделирование, напряженно-деформированное состояние, заготовка, матрица, вытяжное ребро.

УДК 621.771.26.001

Влияние обжатия стенки на изменение высоты фланцев в черновых закрытых балочных калибрах / В.С. Медведев, Е.В. Базарова, В.А. Шпаков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 80–88. Бібліогр.: 10 назв.

Приведены результаты математического моделирования течения металла в черновом закрытом балочном калибре методом конечных элементов. Показано распределение напряжений, перемещений и деформаций в поперечном сечении прокатываемого профиля. Определены интегральные параметры формоизменения. Установлено, что с повышением обжатия стенки общая высота полок уменьшается. Высота открытых и закрытых фланцев увеличивается. Интенсивность роста приращения высоты закрытых фланцев меньше, чем открытых. Для получения двутавровых профилей с высокими фланцами прокатку необходимо вести с интенсивной деформацией стенки в черновых калибрах.

Ключевые слова: балочный калибр, математическая модель, деформация металла, приращение фланцев

УДК 621.98.04

Повышение качества разделительной тонколистовой штамповки / В. Я. Мирзак, В. М. Боков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 88–97. Бібліогр.: 8 назв.

Экспериментально доказано, что при штамповке пластин ротора установка штампа на механический компенсатор погрешностей системы «пресс-штамп», по сравнению с установкой его без компенсатора, существенно повышает качество штамповки за счёт уменьшения высоты заусеница по наружному контуру на 93 % и по внутреннему – на 45 %. Полученный результат подтверждает целесообразность использования механических компенсаторов погрешностей системы «пресс-штамп» с целью повышения качества разделительной тонколистовой штамповки.

Ключевые слова: механический компенсатор, качество разделительной тонколистовой штамповки, величина заусенца, источник погрешностей, пластины магнитопроводов, динамическое подстраивание.

УДК 519.2

Модели суммирования рассеянных повреждений в процессах пластического деформирования / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, В. А. Матвийчук, Е. А. Трач // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 97–102. Бібліогр.: 17 назв.

В данной работе проанализированы ключевые аспекты моделей суммирования повреждений и их формализация для решения задач длительной прочности и деформируемости. Показано широкое использование теории деформируемости в многочисленных зарубежных работах и осуществлен анализ используемой терминологии ключевых понятий. Отмечены преимущества применения теории деформируемости, основанный на выборе определенной модели суммирования повреждений по сравнению с моделями разрушения, встроенными в современные программные комплексы.

Ключевые слова: предельные пластические деформации, показатель напряженного состояния, модели суммирования повреждений, цилиндрическая заготовка, осадка.

УДК 656.132

Повышение эффективности технологического процесса транспортного обслуживания г. Кременчуг / Н.Н. Мороз // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 103–109.

Приведено методы и результаты социалогически-транспортного опроса населения г. Кременчуг. Полученные данные позволяют прогнозировать транспортную подвижность населения для формирования соответственных организационно-экономических решений и обеспечения на этой основе высокой эффективности и качества пассажирских перевозок. Результаты исследований пассажиропотоков и социологического транспортного опроса населения города позволяют внедрить мероприятия к повышению эффективности работы пассажирского транспорта общего пользования.

Ключевые слова: социологические исследования, пассажирский транспорт, транспортное обслуживание.

УДК 621.771

Диагностика технического уровня силовых приводов клетей листовых станов горячей прокатки / Ю.Д. Музикин, В.В. Татьков, А.Ю. Путнока, П.П. Москаленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 110–116. Бібліогр.: 7 назв.

Рассмотрены особенности эксплуатации машин и агрегатов в условиях современного производства. Новым направлением при разработке изделий с высокими эксплуатационными характеристиками является получение наноструктурных композиционных материалов и материалов с преобразованной упорядоченной структурой. Деформационная неустойчивость возникает при деформациях равных предельным равномерным. Предложены методы теоретического определения предельных равномерных деформаций, что позволяет оптимизировать процессы упрочнения пластическим деформирования, калибровки и формоизменения деталей с элементами жесткости.

Ключевые слова: диагностика, силовой привод, кинематические пары, зазор, мониторинг, лазерный прибор.

УДК 539.411.001.24

Корректировка режимов упрочнения пластическим деформированием / Е. А. Наумова, Д. В. Мосьпан, **А. В. Воронин**, **В. В. Драгобецкий** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 116–121. Бібліогр.: 4 назв.

Рассмотрены особенности эксплуатации машин и агрегатов в условиях современного производства. Новым направлением при разработке изделий с высокими эксплуатационными характеристиками является получение наноструктурных композиционных материалов и материалов с преобразованной упорядоченной структурой. Деформационная неустойчивость возникает при деформациях равных предельным равномерным. Предложены методы теоретического определения предельных равномерных деформаций, что позволяет оптимизировать процессы упрочнения пластическим деформирования, калибровки и формоизменения деталей с элементами жесткости.

Ключевые слова: упрочнение, пластическая деформация, устойчивость, структура.

УДК 621.73

Вплив геометричних характеристик опуклих осаджувальних вставок на енергосилові режими при ексцентричному осаджуванні заготовок різної висоти / Ніколенко Р.С. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 122–126. Бібліогр.: 9 назв.

Виконано моделювання методом кінцевих елементів (МКЕ) процесу ексцентричної осадки опуклими вставками при фіксованому значенні ексцентриситету вертикальних осей заготовки та інструменту. Отримано графічні залежності сили осаджування заготовки від ступеня обтиснення, геометричних характеристик деформуючого інструменту і деформируемой заготовки при різних величинах ексцентриситету.

Ключові слова: заготовка, профілювання, опуклі вставки, ексцентриситет, зусилля.

УДК 621.7.011

Выбор критериев деформируемости при оценке использованного ресурса пластичности в процессах обработки металлов давлением / В. А. Огородников, А. В. Грушко, А. В. Гуцалюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 127–137. Бібліогр.: 6 назв.

В статье приведены результаты исследований пластичности металлов при объемном напряженном состоянии. Обработаны экспериментальные данные о влиянии гидростатического давления и его изменения на пластичность металлов. Показано влияние инвариантов тензора напряжений на пластичность. При этом процесс нагружения образцов рассматривается в пространстве трех безразмерных инвариантных характеристик напряженно-деформированного состояния. Показано, что на пластичность оказывает влияние первая и вторая производная от показателей напряженного состояния. Показано также, что критерии деформируемости, основанные на линейной теории накопления повреждений, дают существенное отклонение между результатами расчета и экспериментом.

Ключевые слова: критерий, кривизна пути деформирования, ресурс пластичности, траектория деформирования

УДК 621.77.01

Развитие методов расчётов и совершенствование конструктивных и технологических параметров изготовления трубчатых изделий с профилированной внутренней поверхностью / Ю.Г. Розов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 143–148. Бібліогр.: 6 назв.

В работе предложен и реализован способ получения длинномерной трубчатой заготовки (ствольной заготовки) из короткой заготовки методом гидроэкструзии на подвижной гладкой оправке в среде высокого гидростатического давления. Предложены новые технологии получения прецизионной толстостенной трубчатой заготовки с внутренними винтовыми канавками на примере изготовления нарезного ствола с полигональным профилем, включающие: двухпроходный процесс; прессование-волочение. Впервые разработана методика определения НДС стволов стрелкового оружия с нарезной внутренней поверхностью разной формы.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, метод конечных элементов, оправка, гидроэкструзия, гидростатическое давление, обжатие, волочение, коническая матрица, продольная стойкость, прочность.

УДК 621.923

Оценка влияния интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом на эффективность процесса шлифования / И.А. Рябенков, Ф.В. Новиков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 137–148. Бібліогр.: 8 назв.

В работе получены аналитические зависимости для определения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания на основе раздельного учета энергий “чистого” резания и трения в общем энергетическом балансе процесса шлифования. Теоретически установлено, что с течением времени обработки в связи с интенсивным трением в зоне резания и увеличением упругих перемещений в технологической системе сила резания увеличивается. Проведен теоретический анализ отношения тангенциальной и радиальной

составляющих силы резания и показана возможность его увеличения с целью повышения эффективности шлифования путем поддержания в процессе высокой режущей способности круга.

Ключевые слова: шлифование, резание, трение, шлифовальный круг, сила резания, упругое перемещение, технологическая система, скорость детали

УДК 621.777.4

Определение конструктивных параметров штампа для холодного выдавливания осесимметричных изделий со ступенчатой полостью с растяжением стенки заготовки. / С.Ф. Сабол // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 148–152. Бібліогр.: 4 назви.

Приведена схема конструкции штампа для холодного выдавливания осесимметричных изделий со ступенчатой полостью с растяжением стенки заготовки. Используя закон сохранения объема, осуществлен расчет конструктивных размеров штампа:размеры верхней и нижней полости контейнера, размери регулировочного кольца, использование которого дает возможность изменять скорость контейнера в соответствии с изменением скорости металла стенки изделия в процессе деформирования, что обеспечивает постоянное сцепление бурта выдавливаемой заготовки со ступенькой канала контейнера.

Ключевые слова: холодное выдавливание, осесимметричные изделия, ступенчатая полость, ротстяжение, штамп для выдавливания.

УДК 621.762.4

Особенности взаимодействия элементов динамической системы «вибростол – металлический порошок – пуансон» при двустороннем вибрационном прессовании / Д.В. Савелов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 152–158. Бібліогр.: 5 назви.

Представлена математическая модель динамической системы «вибростол – металлический порошок – пуансон», в которой металлический порошок представлен в виде системы с распределенными параметрами. Получены теоретические выражения, описывающие поведение динамической системы в рабочем режиме: закономерности движения и амплитуды колебаний вибростола и пуансона, которые учитывают направления и соотношения амплитуд возмущающих сил и угловые частоты вынужденных колебаний. Ил.: 2. Библиогр.: 5 назв.

Ключевые слова: математическая модель, динамическая система, металлический порошок, вибростол, пуансон, амплитуда возмущающей силы.

УДК 621.777.01

Исследование процесса уплотнения синтезированных интерметаллидных сплавов при СВС-прессования / Б.П. Середа, Ю.А. Белоконь, Е.В. Бабаченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 158–164. Бібліогр.: 5 назв.

В работе рассмотрены вопросы, связанные непосредственно с получением интерметаллидных сплавов в режиме теплового взрыва, включая важный вопрос перехода от самовоспламенения к уплотнения синтезированного продукта и получения конечного продукта. В экспериментах по определению зависимости общей пористости образцов из γ-TiAl сплава от времени выдержки под давлением варьировали как марки порошка титана, в значительной мере определяющие температуру пористой заготовки после прохождения по ней волны горения. Кристаллизация продукта начинается сначала в тех областях расплава, которые обогащены более тугоплавким компонентом. В зоне догорания происходит донасыщение твердого продукта алюминием . Установлено, что изменение пористости интерметаллидных сплавов при СВС-прессовании в значительной степени зависят от температуры начала прессования, определяемой температурой синтеза состава и времени выдержки при давлении.

Ключевые слова: синтез, интерметаллиды, СВС-прессования, уплотнение, пористость

УДК 621.075.8

Квалиметрия в обработке листовых деталей давлением / М.Е. Тараненко, О.Н. Клименко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 164–170. Бібліогр.: 5 назв..

Предлагается метод оценки качества листовых деталей на этапах подготовки производства, а также функциональные зависимости показателей качества от геометрических размеров деталей. Это позволяет выбирать показатели качества на этапе проектирования. Рассматривается показатель технологичности деталей как комплексный. В качестве составляющих частных показателей количественно анализируются свойства: форма детали, её глубины и некоторых локальных элементов (радиус сопряжения бортов). Для этапа изготовления выбрана иерархическая совокупность свойств для оценки качества производимой продукции.

Ключевые слова: качество, листовые детали, квалиметрия, опытные и статистические данные, иерархическая совокупность свойств.

УДК 621.7.044:658.512.011.56

Возможности программного комплекса классификации листовых деталей для анализа технологичности листовых деталей / В. В. Третьяк, Н. Ф. Савченко, А. В. Онопченко, А. Ф. Федорова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 170–175. Бібліогр.: 4 назви.

Представлены возможности программного комплекса классификации листовых деталей для анализа технологичности листовых деталей. Выявлены особенности использования импульсных технологий для изготовления сложных деталей из листа для аэрокосмического комплекса. Представлена общая схема использования оснастки и оборудования для импульсной технологии варианты различного нагружения заготовки импульсными источниками энергии. Предложена схема обработки информации интерактивным программным комплексом. Представлены перечень меню программного комплекса и рекомендации по его использованию.

Ключевые слова: интерактивный программный комплекс, импульсные технологии, объектный подход к проектированию импульсных технологий.

УДК 628.16:621.981.3

Математическое моделирование элементов новых технологических процессов прокатки / О. И. Тришевский, Н. В. Салтавец // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 175–185. Бібліогр.: 5 назв.

Изложены результаты теоретических исследований моделирования теплового состояния полосы с использованием сверхскоростного охлаждения (UFC) для повышения эффективности процессов прокатки тонкого листа. Полученные данные сопоставлены с результатами экспериментальных исследований французских исследователей. Реконструкция теплового поля этих исследований показала невозможность использования эти результаты для проектирования реальных процессов прокатки, в связи с чем рекомендуется пользоваться разработанной авторами методике математического моделирования.

Ключевые слова: горячая прокатка, полоса, математическая модель, тепловое состояние, сверхбыстрое охлаждение.

УДК 621.762

Моделирование уплотнения конической порошковой заготовки в закрытой жесткой матрице / А.И.Хоменко, Г.А.Баглюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 184–191. Бібліогр.: 2 назви.

Рассмотрена математическая модель одностороннего уплотнения конической заготовки двумя пуансонами в закрытой жесткой матрице при допущении наличия радиальной составляющей течения материала в цилиндрических (технологических) частях матрицы. Описана методика компьютерного моделирования процесса при уплотнении отдельно верхним и нижним пуансонами. Выяснено, что компьютерное моделирование по сравнению с натурным приводит к качественно подобной картине распределения пористости. Некоторые количественные расхождения можно объяснить как допущениями при моделировании, так и погрешностями эксперимента.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, порошковый материал, уплотнение, матрица, пуансон.

УДК 621.923

Разработка математической модели определения параметров шероховатости обработки при абразивном полировании / В.Г. Шкурупий, Ф.В. Новиков, А.Г. Крюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 192–196. Бібліогр.: 5 назв.

Доказано, что при фиксированном радиальном усилии удельное давление в зоне обработки при абразивном полировании уменьшается вследствие увеличения относительной опорной длины микропрофиля обрабатываемой исходной поверхности. В результате уменьшается фактическая скорость радиальной подачи, что соответствует схеме выхаживания при шлифовании. Этим показано, что схема абразивного полирования с фиксированным радиальным усилием является наиболее оптимальной с точки зрения обеспечения условий уменьшения шероховатости при обработке поверхностей со значительной исходной шероховатостью, образованной на предшествующих операциях.

Ключевые слова: абразивное полирование, шероховатость поверхности, радиальное усилие, скорость радиальной подачи, схема выхаживания.

ABSTRACTINS

Deformability of the metal in the process of the threelateral combination extrusion / L. I. Aliieva, A. V. Shkira, K. V. Goncharuk // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 3–7. – Bibliogr.: 5.

The process of the combined three lateral radial longitudinal extrusion for hollow member having an axial appendage and the flange is considered. The simulation was performed in deformation state to determine the fracture criterion cold deformation the aluminum alloy AD31. The calculations were performed with the use of the software engineering program is named QForm 2D. The stress strain analysis with different technical parameters such as flange thickness, diameter of the appendix, the thickness of the bottom and edges of the radii of transition considered. It was found that the critical zone in which the risk of fracture is the outer periphery of the flange. Analyzed the scheme of the stress state and the basic parameters for the determination of resource exhaustion of plasticity. As a result of research obtained by the logarithmic degree of deformation, which will be observed at the beginning of the destruction of the outer flange part.

Keywords: combined extrusion, plasticity resource, flange, destruction.

УДК 621.7.044

Distribution of tensions on the drawing rib of matrix at extraction of cylindrical purveyances / Argat R.G., Puzyr R.G., Dolgih O.N. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 8–13. Bibliogr.: 6.

In the article the theoretical analysis of process of extraction of cylindrical details is conducted from a sheet-metal. It is shown that extraction is the widespread enough and productive method of receipt of cylindrical details from a sheet. However, in a theoretical plan influence of technological and geometrical parameters of process is full not enough exposed on distribution of dangerous stretchings tensions on the drawing rib of matrix. The equilibrium of toroidal shell was examined, from equalizations of equilibrium members, containing tangent tensions in connection with axial symmetry of deformation, were eliminated. As a result of decision jointly with the condition of plasticity dependence is got for the calculation of size of stretchings meridian tensions on the drawing edge of matrix, which allows to take into account influence of coefficient of extraction, corner of scope of drawing edge of matrix by material of purveyance, thickness of the last and radius of rounding of matrix, that enables to take into account influence of aggregate of factors on the sizes of tension P.

Keywords: extraction, sheet purveyance, deformation, plasticity, diameter, radius, equilibriuMoscow

Technological support vibration-free machining holes / T.M. Brizhan, S.A. Ditinenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 13–18. Bibliogr.: 6

Analytically determined the parameters of slices in processing holes scans with oblique teeth and unstressed conditions of processing based on the observance of certain relations between the angle of the teeth sweep, their length and the number. It is shown that placing the cutting teeth sweep inclined, you can provide them with a smooth continuous contact with the material being processed and actually balance the radial component of the cutting force, which is important when renting uneven allowance to improve the machining accuracy of the hole. Also proved the possibility of a significant increase of the actual angle of the tooth front sweep by increasing its angle of inclination, thereby reducing the power strength of the cutting process, in particular the radial component of the cutting forces, which during doffing uneven allowance determines the oscillation intensity in the process system, and respectively the precision machining of the hole. Practical recommendations for the effective implementation of the deployment process openings with irregular allowance providing vibration-free handling and increase the accuracy of machined hole P.

Keywords: deploy holes unstressed treatment, intensity fluctuations, technological system, the processed material, the thickness of the slice.

Forming of the morphologic box as the prerequisite of search for new types of metal forming equipment // V.O. Evstratov / Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 19–31. Bibliogr.: 6

The new approach to classification all equipment for mechanical working proposed. Peculiarity of this approach – creation of the morphological box (table) with 11 axis. In the box there are all versions of equipment constitutions, which we can have according to selected criterions of classification. It is clear, that it is very difficult to select from 10 206 000 variants (it is the content of morphological box) one construction, which my be working ability, but contemporary IT–technologies gives us such possibilities. To help this can such detailed classification.

We believe that we must to use contemporary terminology. That is why we propose some terms, such as blank or half-finished article, forging, stamping, pitmen, crankshaft, eccentric shaft, overhung crank, rate of action. These terms were organized into definite system and used as criterion of classification. That gives us .opportunity to form the morphological box/

Keywords: morphological box, criterion of classification, blank or half-finished article, forging, stamping, pitmen, crankshaft, eccentric shaft, overhung crank, rate of action.

Experimental and theoretical study of strain state of the metal during rolling channel/ S. V. Ershov, P. N. Mel'nik, K. G. Geymur, E. A. Kravchenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 31–39. Bibliogr.: 6.

Forms are not well understood despite the proliferation of them and a large number of experimental studies of the behavior of the metal during rolling in passes trough. The article presents the results of comparing the data of the experimental and theoretical studies of strain state of channels at rolling mill in 9 medium-section mill 350 PJSC «DMK». Was reviewed and analyzed metal forming in various sections of roll – at the entrance of the deformation zone, during the steady rolling process and the output of the roll P. The article conclusions about the presence of the very uneven distribution of broadening and hoods in the deformation zone, the regularities of their distribution.

Keywords: deformation, flange profiles, channels, calibre**,** metal flow.

Device for determining the power parameters of the process of forming shaped tubes / A. S. Zabara // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 39–44. Bibliogr.: 4.

The results of comprehensive research to improve the durability of dies in hot die forging steel. The main reasons for withdrawal dies down, the effect of nitriding steel grade and type of lubrication technology (TC) on the resistance of the dies. Persistence stamps largely determined by the structure and properties of surface layers that undergo the most significant changes in the operation. An effective means for neutralizing the adverse effects of the deformation are technological lubricant friction, which are introduced on the contact surface of the deformable metal tool. Persistence forging dies determines the cost of forgings. The description of the installation for automated application TC stamp engraving. Based on industrial studies establish effective methods of increasing the resistance dies in hot die forging.

Keywords: profiled tube, a device forming, power parameters of the process.

Investigation of the effect of heat on the spring-elastic plastic bending with two-layer sheets / V.G. .Zagoryansky // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 44–51. Bibliogr.: 13.

The paper to theoretical analysis and experimental research of influence of heating at bending of two-layered sheets on their elastic springback is devoted. In the paper dependences for calculation of elastic springback at heating of double-layer sheets (stripes) at bending developed. It is established that temperature of heating effects on change of curvature of sheet because of elastic bending through change of the value of the modulus of elasticity and constants of curve of strengthening. For the double-layer sheets of corrosive-proof bimetal of 09Г2С + 12Х18Н10Т dependences of angle of springback on the temperature of heating of double-layer sheets under bending by a cladding outside and inward are established and the optimal temperatures of heating are determined.

Keywords: plastic bending, two-layer sheet, bending moment, elastic springback, influence of heating.

Power modes and metal forming of profiled blank flanging processes in the matrix with different curvature radiu P. /A. Kaljuzhny, A. Pakholko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 51–59. Bibliogr.: 7.

The results of calculations by finite element method of the cold flanging process holes in profiled blank are considered. Using profiled blank provides parts with a constant wall thicknes P. There are received influence of the matrix curvature radius on the flanging efforts, necking value, stress-strain state and parts quality. Designed deformed metal plasticity resource efficiency. Increasing the radius of curvature of the matrix leads to a decrease in deformation force and increase the height of flanging piece. By modelling received all the necessary data for the design technology of cold flanging holes in the profiled blank P. The experiments have confirmed the calculated data

Keywords: flanging, profiled blank, finite element method, flanging efforts, the stress-strain state of the blank, spherical punch, matrix curvature radius

Study of methods of increasing stamp resistance during hot deformation / B.S. Kargyn, S.B. Kargyn **//** Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 59–64. Bibliogr.: 4.

The results of comprehensive research to improve the durability of dies in hot die forging steel. The main reasons for withdrawal dies down, the effect of nitriding steel grade and type of lubrication technology (TC) on the resistance of the dies. Persistence stamps largely determined by the structure and properties of surface layers that undergo the most significant changes in the operation. An effective means for neutralizing the adverse effects of the deformation are technological lubricant friction, which are introduced on the contact surface of the deformable metal tool. Persistence forging dies determines the cost of forgings. The description of the installation for automated application TC stamp engraving. Based on industrial studies establish effective methods of increasing the resistance dies in hot die forging.

Keywords: die, lubricant, durability, the press, setting, engraving, graphite.

Analytical determination of the cutting forces and the conditions of its reduction / O.S. Klenov, F.V. Novikov, A.G. Kruk // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 64–69. Bibliogr.: 5.

The paper discusses the various theoretical approaches to the determination of the cutting force blade tool. Based on the condition of the maximum shear stress occurring in the conventional shear plane of the processed material, defined the tangential and radial components of the cutting force. It is shown that in the end they are reduced to a single decision, from which derive the basic conditions reduce cutting forces, was to reduce the difference between the conditional friction angle on the front surface of the tool and the tool rake angle. It is also shown that in the case of increasing the difference of these angles to a value equal to 90^0, the cutting force increases without bound. This indicates a high power voltage of the grinding process, characterized by a significant negative rake angle of the cutting grains. It is established that during cutting edge tools, the tangential component of the cutting force greater than the radial component of the cutting force, when grinding, by contrast, is less. Practical recommendations for reducing the power intensity of the process of cutting edge tools.

Keywords: the process of cutting edge tools, cutter, processed material, shavings, si la cutting, shearing stress

Specified method of calculation of the doubled shear resistance of metal at the cold rolling of thin sheets / Korobko T.B., Prisyazhnyj A.G., Sviatoj M., Korenko M.G. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 69–75. Bibliogr.: 8.

In the paper it has been analyzed the mathematical models of double shear resistance of metal at cold thin sheet rolling. On the basis of the analysis there has been shown that it is reasonable to account the impact of temperature-rate conditions of strain in the presented model P. The improved by the authors a numeric mathematical model allows specifying the calculation of doubled shear resistance of metal considering temperature and rate of cold thin sheet rolling as well as real character of distributions along the deformation zone of its dimensional parameters and indicators of external contact friction.

Keywords: cold rolling, elasticity stress, double shear resistance, temperature-rate conditions, deformation zone, mathematic simulation.

Research influence of the matrix with pull edge on the stress-strain state at stamping bottoms. / A.A. Lipchansky // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 75–80. Bibliogr.: 7.

The results of investigation of the stress-strain state of the draw bottoms in the matrix with the pull edge. Package used finite element analysis of 2D strain. Aim is to study the stress-strain state of the metal blank and power modes of its deformation during hot sheet stamping bottoms. Established distribution of logarithmic strain , the strain rate and the stress intensity in the workpiece blank with holder. Observed that the proposed method of calculating the hot stamping bottoms allows more reliably predict the signs of a marriage in the design process operations sheet stamping. Analysis of the results showed that the proposed technique is promising due to the use of the matrix made with the pull edge. Use of this technology will reduce the number of clicks and increase productivity.

Keywords: modeling, stress-strain with distance, workpiece, pull edge.

Impact of wall compression on changing of flange height in roughing closed beam passes / V. S. Medvedev, E.V. Bazarova, V.A. Shpakov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 80–88. Bibliogr.: 10.

One be provided results mathematics modeling of metal flow in roughing closed beam pass by method of finite element P. One be shown distribution of efforts, transferrings and deformations in cross-section of rolling profile. Integral parameters of forming were defined. It is installed that when wall compression increases, total web height decrease P. Open and closed flange height increase P. When thickness coefficient of wall compression changes from 1.373 to 2.371, relation of web heights before and after rolling rises from 1.091 to 1.211, and relation of proper heights of open and closed flanges decreases from 0.762 to 0.542 and from 0.841 to 0.779. Intensity of rise of height increment of closed flanges is less than open one P. To obtain H-sections with high flanges, rolling must be made with intensive deformation of wall in roughing passe P.

Keywords: beam pass, mathematics model, metal deformation, flange increment.

Improvement of dividing thin-sheet stamping quality / V. Y.Mirzak, V. M. Bokov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 88–97. Bibliogr.: 8.

It has been experimentally proven that while punching the rotor plates the mounting of the punch on the mechanic compensator considerably increases the quality of “press-punch” comparing with the mounting without the compensator. It occurs due to the decrease of the height of the agnail around the outer contour by 93 % and inner contour by 45 %. Distribution of the height of the agnail according to the perimeter of the plates’ contour, which are

punched and breached, a more even while mounting of the punch on mechanical compensator of faults of the system of "press-punch". This shows the decrease in the amplitude of the dynamic clearance. The result we have got proves the advisability of using mechanic compensators of faults of the system "press-punch" in order to increase the quality of separating thin plate punching.

Keywords: mechanic compensator, the quality of separating thin plate punching, height of the agnail, the source of faults, rotor plates, dynamic adjusting.

Models summation of scattered damage during plastic deformation / V. M/ Mykhalevych, Yu. V. Dobranyuk, V. A. Matviychuk, Y. A. Trach // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 97–102. Bibliogr.: 17.

In this paper we analyzed key aspects of damage summation models and their formalization for solving problems of long-term strength and deformability. Is shown the widespread use of the theory of deformability in numerous foreign papers and analysis done terminology used the key concept P. Is noted advantages of applying the theory of deformability, based on the choice of a particular model of damage summation compared to the fracture model embedded in modern software system.

Keywords: limiting plastic strains, the rate of stress state, damage summation model, a cylindrical blank, compression

Improving technological process efficiency of transport services in Kremenchuk city / M.M. Moroz // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 103–109.

Is given methods and results of sociological-transport interrogation of the population Kremenchug. Is established, that the average duration of expectation at hours o'clock flows passenger is less than at evening rush hour P. The analysis of interrogation has shown wide use by the inhabitants of public transport for the various purpose P. The algorithm of sociological transport interrogation of the population is developed. The received data allow to predict transport mobility of the population for formation of the respective organized economic decisions and maintenance on this basis of high efficiency and quality of passenger transportation. On the data of research on trolleybus routes of Kremenchug the tendency of preservation flows passenger is observed. The results of researches flows passenger and sociological transport interrogation of the population of city allow to introduce measures to increase of an overall performance of passenger transport of general usage.

Keywords: sociological researches, passenger transport, transport service.

Mode correction of plastic deformation hardening / E.A. Naumova, D.V.Mospan, A.V.Voronin, V.V.Dragobetskiy // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 110–116. Bibliogr.: 17.

The characteristics of operation of machines and plants in the conditions of modern production are investigated. A new direction in the development of products with high performance is to obtain nanostructured composite materials and materials with a transformed ordered structure. Experimantal and theoretical analysis of hardening processes are performed. Several directions of hardening methodologies are investigated. The second direction is more economical and less energy consumptive. Formation of ordered structures is most likely in conditions of heat, deformation and power imbalance. Deformation instability occurs when strain is uniform limit. Methods of determining the theoretical limit of uniform strain are offered. The use of the results allows to optimize the processes of plastic deformation hardening, calibration and forming parts with stiffener P.

Keywords: hardening, plastic deformation, stability, structure.

Diagnosis of sheet hot rolling mills stands actuators technical level / Y. D. Muzykin, V. V. Tatkov, A. J. Putnoka, P. P. Moskalenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 116–121. Bibliogr.: 7.

The problems of diagnosing the technical level of the actuators. proposed to estimate the total wear in all kinematic pairs involved in the transmission of torque from the electric motor to the work rolls stand, fixing backlash when reversing mechanical drive without load. Process the results of observations of change in torque on the shaft of the drive motor, which is directly connected to the gear shaft load gear finishing stand. In carrying out diagnostics of technical condition of actuators proposed to estimate the total wear in all kinematic pairs involved in the transmission of torque from the electric motor to the work rolls stand, fixing backlash when reversing mechanical drive without load. Provides a method of monitoring the change in the total clearance by the use of a laser device «Leica DISTO» A6. The method allows the residual life of the mechanical system.

Keywords: diagnosis, actuator, kinematic pairs, clearance, monitoring, laser.

Influence of the geometric characteristics of convex upsetting die-box on the power modes at the eccentric upsetting of billets with different height / R.S. Nikolenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies

and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 122–126. Bibliogr.: 9.

The introduction of pre-profiling operations to achieve approximation workpiece shape configuration at stamping forging widespread in modern forging and stamping industry and is very promising in terms of the further development of technology.

Performed by finite element method (FEM) of rainfall convex inserts a fixed value of the eccentricity of the axes of the workpiece and the tool. Graphic dependences obtained efforts rainfall harvesting on the degree of compression, the geometric parameters of the deformation tool and the relative height of the deformed workpiece during a eccentricity.

The study of power modes for operations prior profiling will allow in the future, to clarify the methods of choice press equipment at the marginal nominal strength and safe load in the actuator with automatic modes Banded punching and profiling with combination punches per stroke of the press.

Keywords: workpiece, profiling, convex die-box, eccentricity, effort.

Selection criteria used in the evaluation of the deformability of the resource of plasticity in metal forming processes / V.A. Ogorodnikov, A.V. Grushko, A.V. Gutsalyuk// Bulletin of NTU "KhPI". Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 127–137. Bibliogr.: 6.

The paper presents the results of studies of plasticity of metals at a volume stress. Treated with the experimental data on the effect of hydrostatic pressure and its change on the plasticity of metals. The analyzes were conducted experimental studies of plasticity steels R18, R9, 45. The influence of the invariants of the stress tensor on the plasticity. The process of loading the samples considered in the space of three dimensionless invariant characteristics of the stress-strain state. It is shown that the plasticity is affected first and second derivative of the indicators of stress state. We also show that the deformability criteria based on the linear damage accumulation theory, provide a significant deviation between the calculated and experimental results. Calculations were performed according to the criteria G. A. Smirnov-Alyaev, V. A. Ogorodnikov, V. L. Kolmogorov. In terms of volume stress state on ductility affects the rate of variation of the stress state, and the curvature of the path of deformation.

Keywords: criterion, the curvature of the path of deformation, the resource of plasticity, deformation path.

Development of methods of calculations and perfection of structural and technological parameters of making of tubular products with the profiled internal surface / Ya.G. Rozov // Bulletin of NTU "KhPI". Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 137–143. Bibliogr.: 6.

In this work, the method of production long-measuring tubular blank (barrel blank) from a short blank by hydrostatic extrusion on the smooth moving mandrel in the high-pressure medium is proposed. We propose the new technologies for receive precision thick-walled tubular blank with inside screw groove by manufacturing rifled barrel with polygonal section: double-line process, based on crimping barrel blank on the profile mandrel by rolling (wire drawing) idle rollers; pressing-wire drawing of barrel blank with the profile mandrel through the smooth conic mould with the fixation (centering) of blank on parallel land without limitation and with limitation of flow of metal on length. For the first time the method of detection VAT for barrels of small-arms with the inside rifled surface of various shape, situated under the influence of internal static and dynamic loading based on the use of FEM.

Keywords: computer simulation, finite element method, mandrel, hydrostatic extrusion, hydrostatic pressure, rolling-wire drawing, pressing-wide drawing, conic mould, longitudinal stability, deformation site.

Assessing the impact of the intensity of the friction circle bundles to the material on the efficiency of the grinding process / I.A. Ryabenkov, F.V. Novikov // Bulletin of NTU "KhPI". Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 143–148. Bibliogr.: 5.

We obtain analytical dependence for the determination of the tangential and radial component of the cutting force on the basis of separate accounting of energy "clean" cutting and friction in the overall energy balance of the grinding process. Theoretically found that over time the processing due to the intense friction in the cutting zone and the increase of the elastic displacements in the process system, the tangential and radial components of the cutting force increases, and, the radial component of a greater degree. The theoretical analysis of the tangential and radial component of the cutting force and it is shown that when sanding it is always less than unity due to the intense friction in the cutting zone. Theoretically grounded conditions increase this ratio to improve grinding efficiency by maintaining in the process of high cutting power and reduce the intensity of the circle of friction in the cutting zone. The paper presents practical recommendations to improve implementation of the grinding process by reducing friction ligament grinding wheel to the material in the cutting zone.

Keywords: grinding, cutting, rubbing, grinding wheel, cutting force, elastic movement, technological system, the rate details

Determination of structural parameters of cold extrusion dies for axisymmetrical articles on stretching speed cavity wall piece / S.F.Sabol // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 148–152. Bibliogr.: 4.

Using high-performance cold extrusion processes cavities significantly reduced the cost of metals while ensuring accuracy, high mechanical properties and performance of the product. But high specific efforts that arise when implementing these processes, restricting the use of cold extrusion, causing low resistance tool. One way to reduce the efforts of cold extrusion is to change the system stress state process: a comprehensive scheme of uneven compression - to styskuvalno- roztyahuvalnu, to support extrusion stretching from wall piece.

Powered circuit design stamp for cold extrusion of hollow articles with step axisymmetrical cavity wall stretching from the workpiece. On the basis of the law of conservation Extent, design calculations made stamp size: the size of the upper and lower cavity of the container, the size of the control ring, the use of which enables to change the speed of movement of the container in accordance with the change of speed metal wall piece, during deformation, ensuring constant zscheplennya channel container wall of the collar piece that is squeezed.

Keywords: cold extrusion, axially symmetric products, speed cylindrical cavity expansion, stamp for extrusion

Features of co-operation of elements of the dynamic system «vibration table is metallic powder - puncheon» are at the bilateral oscillation pressing / Savelov D.V. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 152–158. Bibliogr.: 5.

The mathematical model of the dynamic system is presented «vibration table is metallic powder is a puncheon», in which metallic powder is presented as a system with the up-diffused parameters. Theoretical expressions, describing the conduct of the dynamic system in an operating condition, are got: conformities to law of motion and amplitude of vibrations of вибростола and puncheon, which take into account directions and correlations of amplitudes of revolting forces and pulsatances of the forced vibrations.

Keywords: mathematical model, dynamic system, metallic powder, vibration table, puncheon, amplitude of revolting force.

Study of intermetallic alloys densing process during SHS-pressing / B. P. Sereda, Y. A. Belokon, E. V. Babachenko// Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 158–164. Bibliogr.: 5.

The paper discusses issues related directly to obtaining of intermetallic alloys in the thermal explosion mode, including the important question of the transition from self-ignition to compressing the synthesized product and the final product. In experiments to determine the dependence of the total porosity of the samples of γ-TiAl alloy of holding time under pressure varied as the brands of titanium powder, is largely determined by the temperature of the porous preform after the passage through it of the combustion wave. Crystallization of the product started first in areas of the melt, which are enriched in a refractory component. In the area of afterburning occurs additional saturation of solid aluminum. It was established that changing the porosity of intermetallic alloys during SHS pressing largely depend on the temperature starts compressing defined composition synthesis temperature and holding time at pressure.

Keywords: synthesis, intermetallics, SHS-pressing, packing, porosity

Qualimetry in processing of sheet articles by pressure / M.E/ Taranenko, **O.N. Klimenko** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 164–170. Bibliogr.: 5.

The method of estimation quality of sheet articles at stages of manufacturing preparation and functional dependencies of quality parameters on geometrical dimensions of articles is suggested. This permits to select quality parameters at the stage of design. The factor of articles manufacturability as complex one is considered. Qualitative analysis of partial factors of such properties as article shape, its depth and some local elements (radius of bevels coupling) is conducted. Here the manufacturability factors are formulated by means of summarizing of partial factors without their importance influence. Such approach is grounded on equal importance of each factor. Manufacturability factor of corner local elements is assumed to be equal to drawing coefficient for corner zones of box-like articles. At developing factors of quality of manufacturing articles it is recommended to use standard formula of convolution with weighting coefficient application. For the stage of manufacturing the hierarchical set of properties for estimation quality of products under manufacturing is selected.

Keywords: quality, sheet articles, qualimetry, experimental and statistical data, hierarchical set of properties.

Possibilities of program complex of classification of sheet details for analysis of technological of sheet details / V. V. Tretyak, N. F. Savchenko, A. V. Onopchenko, A. F. Fedorova // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 170–175. Bibliogr.: 4.

Possibilities of program complex of classification of sheet details for the analysis of technological of details from sheet are presented. The features of use of impulsive technologies for making of difficult details from sheet for the aerospace complex are exposed. A general chart of the use of rigging and equipment for impulsive technology variants of a different loading of purveyance by the impulsive energy sources is presented. A chart of treatment of information by the interactive program complex is offered. List of menu of program complex and recommendation on its use are presented.

Keywords: interactive program complex, impulsive technologies, objective approach to planning of impulsive technologies

Mathematical modeling elements of new technological processes of rolling / A. I. Tryshevskyy, M. V. Saltavets // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 175–184. Bibliogr.: 5.

The results of theoretical studies modeling the thermal state of the band using ultrafast cooling (UFC) to improve the processes of rolling thin sheet. To speed up the establishment of a domestic issues of technology and equipment for ultrafast cooling bandwidth between roughing and finishing stands a group of mathematical models and software packages in C ++ to implement them. The data are compared with experimental results of French researchers. It is shown that the implementation of ultrafast cooling is realistic. We solve the problem of processing test results to use them to design elements of the new technology of rolling sheet. The results of mathematical modeling of conditions of work suggests that the authors failed to experimentally achieve efficient operation of devices for cooling the lower band. Reconstruction of thermal field of research has shown the inability to use these results for the design of real processes of rolling, and therefore recommended to use the authors' method of mathematical modeling.

Keywords: hot rolling strip, mathematical model, the thermal state zverhshvidkisne cooling.

Simulation of conic powder billet compaction in the closed rigid die / A.I. Khomenko, G.A. Baglyuk // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 184–191. Bibliogr.: 2.

Conic powder billets are of exceptional interest both practical to produce high-density powder details and theoretical to provide appropriate computing models predicting details properties.Computer simulation of conic powder billet compaction in the closed rigid die was realised basing on the direct variation method combined with the elements of visioplastic method. Strain rate tensor components are obtained using material flow equations then energy functional is formed using these components and minimized to obtain unknown parameters. Then these parameters are used to obtain new position of some fixed points at the billet section to calculate deformation and local porosity changes. Qualitative similarity of porosity distribution for computated model and real laminated billet was found. Some quantitative differences make necessary model assumptions futher check.

Keywords: computer simulation, powder material, compaction, die, puncheon.

Development of a mathematical model for determining the roughness parameters when processing abrasive polishing / V.G. Shkurupiy, F.V. Novikov, A.G. Kruk // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2014. – № 43 (1086). – P. 192–196. Bibliogr.: 5.

Proved that with a fixed radial force specific pressure in the treatment zone when polishing abrasive is reduced due to increase in the relative bearing length microprofile processed original surface. This reduces the actual speed of the radial flow, which corresponds to the pattern of nursing in grinding, is intended to reduce the surface roughness and reduction of the elastic displacements arising in the process system in the grinding process, i.e. to increase the processing accuracy. This shows that the scheme with a fixed abrasive polishing radial force is the most optimal in terms of reducing the roughness of the conditions in the processing of surfaces with significant initial roughness formed on the preceding operations, that is, this scheme provides a high accuracy and surface roughness of machined surfaces. Practical recommendations for improving the application of abrasive polishing process on the finishing operation processing precision parts, based on the developed mathematical model of the process of polishing abrasive conditions justified reducing the roughness of machined surfaces.

Keywords: abrasive polishing, the surface roughness, the radial force, of the radial velocity, of the feed circuit sparking.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Збірник наукових праць

Серія
«Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії»

Випуск 43 (1086) 2014

Науковий редактор: д-р техн. наук проф. А.П. Марченко

Технічні редактори: Т.Л.Коворотний, О.С. Курандо

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г.Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, м. Харків, вул.. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ»
каф. обробки металів тиском, тел. (057) 707-60-40, 707-69-16, e-mail:

Обл. вид. № 91-14

Підп. до друку 18.11.2014 р. Формат 60х84 1/16. Папір офсетний. RISO-друк. Гарнітура Таймс.
Ум.друк.арк. 8,6. Обл.-вид. арк. 8.9.
Наклад 300 прим. Зам. № 17. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».
Свідоцтво про державну регістрацію ДК № 116 от 10.07.2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Видавництво та друк ФО-П Шейніна О.В.
61052, Україна, м. Харків, вул. Слов'янська, 3
Тел. 057 759-48-79
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 2779 від 28.02.2007 р.