



ISSN 2076-2151

О

М

Д

# ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ



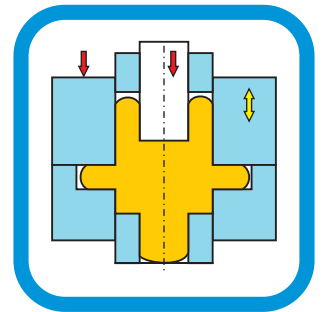
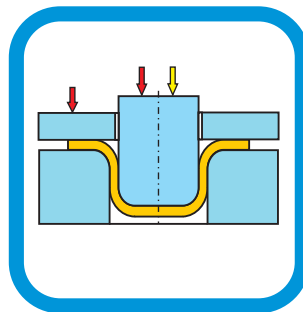
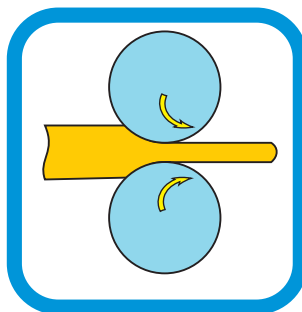
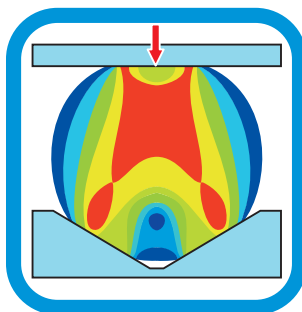
ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ



MATERIALS WORKING BY PRESSURE



UMFORMTECHNIK



№3 (28)



2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ  
И СПОРТА УКРАИНЫ

ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ  
АКАДЕМИЯ

**ОБРАБОТКА  
МАТЕРИАЛОВ  
ДАВЛЕНИЕМ**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

**№ 3 (28) – 2011**

Краматорск

УДК 621.7

**ОБРАБОТКА  
МАТЕРИАЛОВ  
ДАВЛЕНИЕМ**

**Сборник научных трудов  
№ 3 (28) – 2011**

Основатель  
Донбасская государственная  
машиностроительная академия  
Свидетельство  
про государственную регистрацию  
серия КВ № 13770-2744Р  
от 17.03.2008

**ОБРОБКА  
МАТЕРІАЛІВ  
ТИСКОМ**

**Збірник наукових праць  
№ 3 (28) – 2011**

Засновник  
Донбаська державна  
машинобудівна академія  
Свідоцтво  
про державну реєстрацію  
серія КВ № 13770-2744Р  
від 17.03.2008

**MATERIALS  
WORKING BY  
PRESSURE**

**Collection of science papers  
№ 3 (28) – 2011**

Founder  
Donbass State  
Engineering Academy  
Registration certificate  
№ 13770-2744Р  
dated 17.03.2008

Сборник «ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ» включен в Перечень научных специализированных изданий ВАК Украины по техническим наукам для опубликования результатов диссертационных работ (постановление № 1–05/2 от 27.05.09 г., бюллетень ВАК Украины № 8, 2009).

Рекомендовано к печати ученым советом Донбасской государственной машиностроительной академии (протокол № 10 от 30.06.2011).

В сборнике размещены статьи различных направлений процессов и машин обработки материалов давлением, подготовленные профессорско-преподавательским составом, научными сотрудниками, аспирантами, соискателями, специалистами. Сборник предназначен для научных и инженерных работников, аспирантов и студентов.

У збірнику розміщено статті різних напрямків процесів і машин обробки матеріалів тиском, підготовлені професорсько-викладацьким складом, науковими співробітниками, аспірантами, здобувачами, фахівцями. Збірник призначений для наукових й інженерних працівників, аспірантів і студентів.

Different articles of various directions of processes and machines of materials forming, prepared by the faculty, scientific employees, post-graduate students, competitors, experts are placed in this collection. The collection is intended for scientific and engineering workers, post-graduate students and students.

**Редакционная коллегия:** Алиев И. С., д-р техн. наук, проф. (председатель редакционной коллегии); Бейгельзимер Я. Е., д-р техн. наук, проф.; Доброносков Ю. К., канд. техн. наук, доц., (ответственный секретарь); Гуменюк Ю. И., д-р техн. наук, проф. (Россия); Дья Х., д-р техн. наук, проф. (Польша); Заблоцкий В. К., д-р техн. наук, проф.; Кассов В. Д., д-р техн. наук, проф.; Лаптев А. М., д-р техн. наук, проф.; Миленин А. А., д-р техн. наук, проф. (Польша); Мороз Б. С., д-р техн. наук, проф. (Россия); Огородников В. А., д-р техн. наук, проф.; Роганов Л. Л., д-р техн. наук, проф.; Розенберг О. А., д-р техн. наук, проф.; Сатонин А. В., д-р техн. наук, проф.; Сосенушкин Е. Н., д-р техн. наук, проф. (Россия); Тарасов А. Ф., д-р техн. наук, проф.; Титов В. А., д-р техн. наук, проф.; Федоринов В. А., канд. техн. наук, проф.; Шестаков Н. А., д-р техн. наук, проф. (Россия); Яковлев С. С., д-р техн. наук, проф. (Россия).

**Ответственный за выпуск** д-р техн. наук, проф. Алиев И. С.

**Обработка материалов давлением** : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 3 (28). – 322 с.

**ISSN 2076-2151**

Статьи прорецензированы членами редакционной коллегии.  
Материалы номера печатаются на языке оригинала.

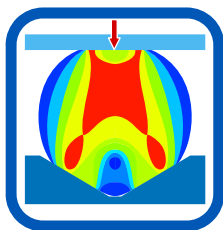
**ISSN 2076-2151**

© Донбасская государственная  
машиностроительная академия, 2011  
© Донбаська державна машинобудівна  
академія, 2011  
© Donbass State Engineering Academy, 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

## ЗМІСТ

## CONTENT



РАЗДЕЛ I  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

**Голубчик Р. М., Меркулов Д. В., Шелест А. Е.**

Показатель сравнения режимов при обработке металлов давлением

3

**Шинкин В. Н., Коликов А. П.**

Моделирование процесса пластического формоизменения листовой заготовки для производства труб большого диаметра

7

**Ярошенко Т. В., Сивак І. О.**

Ступінь зміцнення металу та залишкові напруження в поверхневому шарі деталі після обкочування тороїдальним роликком

12

**Периг А. В., Паламарчук В. А., Ткаченко Я. Ю., Михеенко Д. Ю.**

Конечно-элементное моделирование краевого эффекта в процессе равноканального углового прессования

16

**Сатонин А. В., Настоящая С. С., Переходченко В. А.**

Исследование напряженно-деформированного состояния металла при горячей прокатке относительно тонких полос

23

**Смирнов Е. Н., Смирнов А. Н., Жога А. Ю., Скляр В. А., Снитко С. А.**

Расчётное исследование напряженно-деформированного состояния металла непрерывнолитых блюмов при редуцировании в линии МНЛЗ со сдвиговой деформацией

29

**Соколов Д. Ф., Васильев А. А., Колбасников Н. Г., Соколов С. Ф.**

Разработка математической модели для определения размера зерна феррита с целью повышения точности модели горячей прокатки

36

**Столбченко М. Ю., Гридин А. Ю.**

Применение модуля Ansys Flotran для моделирования процесса валковой разливки-прокатки полос

41

**Медведев В. С.**

Единый системный подход к решению задач пластического течения металла в сложных фасонных калибрах

45

**Ярошенко О. А., Мроз С., Самсоненко А. А., Чепаченко И. В.**

Теоретическое исследование возможности расщепления проката при прокатке специальных сталей в сортовых калибрах простой формы

51

**Андреев В. В., Беляев С. М., Кузьмин А. С.**

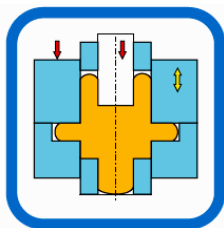
Теоретическое определение деформационных и энергосиловых параметров процесса прессования труб из алюминиевого сплава системы Al–Mg–Sc

54

**Чуев А. А.**

Моделирование процесса продольной прокатки с целью повышения точности труб

59



## РАЗДЕЛ II ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**Стасовский Ю. Н., Чухлеб В. Л.**

Технологическое проектирование в процессах кузнечно-штамповочного производства. Состояние вопроса, проблемы и перспективы развития на новом уровне

66

**Алиев И. С., Жбанков Я. Г., Таган Л. В.**

Ковка эксцентриковых валов смещением и последовательной осадкой в кольцах

72

**Василевский О. В., Грушко А. В., Кухарь В. В.**

Исследование деформированного состояния поковок типа валов при ковке в комбинированных бойках

78

**Добряк В. Д., Балакин В. Ф., Угрюмов Ю. Д., Угрюмов Д. Ю.**

Определение усилия зацентровки слитков

83

**Угрюмов Ю. Д., Балакин В. Ф., Угрюмов Д. Ю., Постой Е. И.**

Пути снижения разностенности при прошивке слитков в стаканы на горизонтальных прессах

88

**Одинцов А. Н., Григоренко В. У.**

Развитие технологии объемной штамповки детали сложной формы при помощи моделирования течения металла с использованием систем конечно-элементного моделирования

94

**Филиппов Ю. К., Разулин А. В., Крутина Е. В., Молодов А. В., Тишкин И. А., Игнатенко В. И.**

Разработка технологического процесса холодной объемной штамповки детали «корпус заряда»

97

**Алиев И. С., Матвийчук В. А., Махмудов К. Д.**

Исследование влияния процессов локального деформирования на служебные характеристики изделий

102

**Краєвський В. О., Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Краєвський С. О.**

Визначення зусилля деформування при ротаційній витяжці із врахуванням дії пружних елементів

108

**Руденко Н. А., Лаптев А. М., Попивненко Л. В.**

Исследование прочности и изменения размеров спеченных пористых материалов состава железо-медь-бикарбонат аммония

114

**Медведев М. И., Беспалова Н. А., Панченко С. А., Захарченко А. П., Чекмарев В. В.**

Оценка контактных напряжений при прессовании труб из нержавеющей и легированных сталей

119

**Курсенко А. Л., Милостных М. В., Коробко Т. Б.**

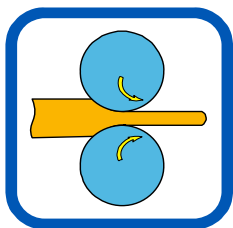
Обзор способов выполнения ультразвукового автоматического контроля железнодорожных осей в радиальном направлении

123

**Лаптев А. М., Ткаченко Я. Ю., Жабин В. И.**

Построение диаграммы для определения коэффициента трения в формуле Леванова по методу осадки кольца

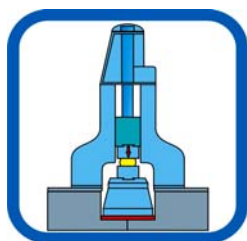
129



### РАЗДЕЛ III ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МЕТАЛЛУРГИИ

- Коновалов Ю. В., Хохлов А. С., Голощанов Д. А.**  
Новые схемы прокатки на станах с печными моталками 133
- Лещенко А. И., Воробей С. А.**  
Методы расчета сопротивления, создаваемого неприводными клетями в процессе прокатки 136
- Онучин А. Б., Романцев Б. А., Гончарук А. В., Латкин Д. И.**  
Разработка методики расчета площади контакта металла с валком при винтовой прокатке 142
- Максименко О. П., Романюк Р. Я.**  
Уточнение режима натяжений при прокатке на стане 1700 148
- Николаев В. А., Васильев А. Г., Васильев А. А.**  
Особенности прокатки на станах горячей прокатки с разделением чистовой группы клетей 153
- Ремез О. А., Калинин К. С., Сабарня М. Е., Самсоненко А. А.**  
Исследование влияния факторов прокатки на изменение ширины заготовки в очаге деформации 159
- Тубольцев А. Г.**  
Экспериментальное исследование момента прокатки швеллера в универсальном калибре 164
- Бергман Г. В., Краев М. В., Бубенок А. И.**  
Особенности производства профиля СВП-33 на линейном стане 800 ПАО «Евраз-ДМЗ им. Петровского» 168
- Нехаев Н. Е., Измайлова М. К.**  
Исследование формоизменения и энергосиловых параметров при прокатке П-образных профилей в четырехвалковых калибрах 171
- Калюжний О. В., Пахолко С. А.**  
Розрахунково-експериментальний аналіз впливу відносної товщини заготовки на силові режими та якість виробів при відбортунні 177
- Гридин А. Ю., Шапер М., Данченко В. Н.**  
Получение полос из высокопрочных алюминиевых сплавов валковой разливкой-прокаткой 184
- Стасовский Ю. Н.**  
Особенности деформирования, мировой опыт, современные проблемы и приоритетные направления развития технологий производства труб с применением процессов волочения 195
- Бобух А. С., Терещенко А. А., Фролов Я. В.**  
Исследование влияния режима деформации при холодной пильгерной прокатке на изменение структуры металла труб после термической обработки 202

- Губенко С. И., Беспалько В. Н., Балев А. Е.**  
Особенности трансформации субструктуры стали 08X18H10T при косо́й прокатке 207
- Колповский В. Н., Дрожжа П. В., Гладкий Ю. А., Демский Н. Н.**  
Исследование неустойчивости процесса непрерывной оправочной прокатки труб 211
- Мищенко О. В., Григоренко В. У.**  
Дослідження механізму зменшення поперечної різностінності труб при холодній прокатці на оправці 216
- Горбанев А. А., Токмаков П. В., Раздобреев В. Г., Паламарь Д. Г.**  
Перспективы развития производства катанки 220
- Должанський А. М., Петльований Є. О., Ломова О. Б., Ломов І. М.**  
Запобігання негативного впливу відокремлюємих голкоподібних поверхневих утворень сталевий низьковуглецевої катанки на стабільність процесу її волочіння 225
- Колбасников Н. Г., Зотов О. Г., Лукьянов А. А.**  
Исследование влияния структурных особенностей материала на характеристики разрушения при испытании падающим грузом 229



#### РАЗДЕЛ IV ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНАСТКА ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

- Владимиров Э. А., Шоленинов В. Е., Сагайда С. В.**  
Новые схемы клиношарнирных механизмов 233
- Корчак Е. С.**  
Совершенствование системы ускоренного заполнения рабочих цилиндров гидравлических прессов жидкостью низкого давления 237
- Курдюкова Л. А., Козленко Д. А.**  
Модель клетки толстолистового стана 241
- Вышинский В. Т., Рахманов С. Р., Николаенко Ю. Н., Удовик П. В.**  
Исследование динамики станов холодной прокатки труб 247
- Дехтярев В. С.**  
Развитие метода построения калибровки станов холодной прокатки труб 253
- Рахманов С. Р., Гамидов Ф. Д., Абдуллаев Г. С.**  
Совершенствование калибровки валков редуционного стана 258
- Рахманов С. Р., Тополов В. Л.**  
Моделирование виброактивности стержня оправки прошивного стана трубопрокатного агрегата 264
- Фридман В. М., Харитонов А. П., Постный В. А.**  
Параметры настройки пилигримового стана при прокатке труб нефтяного сортамента 270
- Шеногин В. П., Тепин Н. В., Шеногина А. А.**  
Проектирование осевой опоры сортопрокатной клетки на основе морфологического анализа 274
- Шеногин В. П., Тепин Н. В., Нелюбин С. А., Загуменов А. П.**  
Использование морфологического анализа при проектировании прокатной клетки 279
- АННОТАЦИИ** 284

УДК 621.77

Краєвський В. О.  
Матвійчук В. А.  
Михалевич В. М.  
Краєвський С. О.

### ВИЗНАЧЕННЯ ЗУСИЛЛЯ ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ РОТАЦІЙНІЙ ВИТЯЖЦІ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ДІЇ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Круглі листові вироби з буртами охоплюють широку номенклатуру листових виробів. При відносно невеликих розмірах такі вироби отримують витяжкою листових заготовок. Для відбортування кришок і комірців бражних і ректифікаційних колон нами був розроблений процес ротаційної витяжки, а також спроектований і виготовлений розкочувальний пристрій до лоботокарного верстата ЛТ2 [1], складальне креслення та загальний вигляд якого показано на рис. 1 та 2.

Давильний інструмент представляє собою конічний ролик, бокова поверхня якого проектується в залежності від бокової поверхні бурта деталі. Давильний ролик 1 встановлюється в гніздо осі 2, при цьому державка 5 розміщується під необхідним кутом до осі оправки на супорті 4, який разом з державкою 5 і давильним роликом 1 підводиться до ділянки заготовки, яка відбортовується. Підпружинення давильного ролика 1 пружними елементами 6 дозволяє запобігати перевантаженням пристрою при радіальному битті поверхні оправки, а також формувати бурти при від'ємному куті нахилу бокової поверхні оправки, що передбачається для компенсації пружинення заготовки.

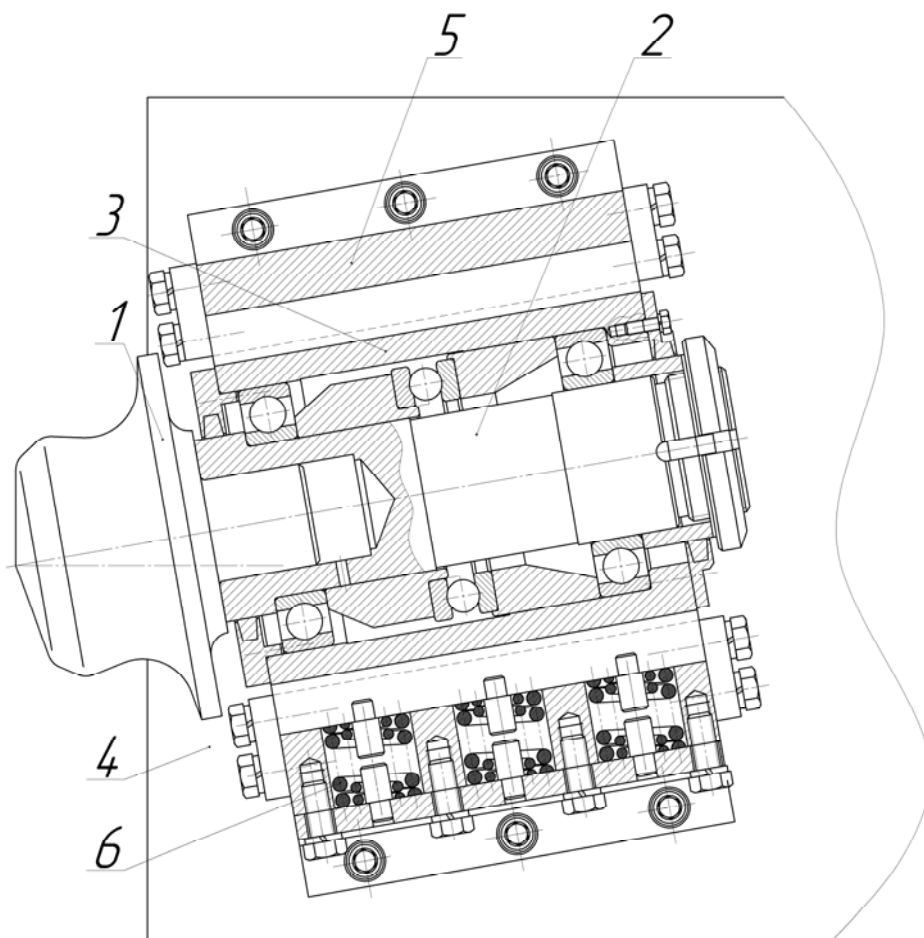


Рис. 1. Складальне креслення розкочувального пристрою до лоботокарного верстата ЛТ2





Рис. 2. Розкочувальний пристрій (а) і готові вироби (б)

Розроблений процес показав високу ефективність – високу продуктивність при забезпеченні необхідної якості виробів. Однак, оскільки давильний інструмент проектується на лоботокарний верстат, тобто обладнання, яке фактично не призначене для таких операцій, то необхідно провести енергосиловий розрахунок відборування для забезпечення безвідмовної роботи цього обладнання [2, 3], а також для забезпечення компенсації пружинення заготовки.

Метою роботи є розробка методики визначення зусилля деформування при ротаційній витяжці із врахуванням дії пружних елементів.

Розкладемо зусилля  $\bar{P}$ , яке діє із боку заготовки на валок на дві складові: одна складова  $P'_y$  паралельна осі обертання валка, інша  $P'_x$  – перпендикулярна цій осі (рис. 3). У попередніх роботах [3] при визначенні зусилля деформування  $\bar{P}$ , вводили такі позначення його складових:  $P_y$  – паралельна осі обертання заготовки, інша  $P_x$  – перпендикулярна цій осі. Кут між осями обертання валка та заготовки – кут  $\alpha$ . Тоді складові повного зусилля  $P'_x$  та  $P'_y$  через  $P_x$  та  $P_y$  запишуться у вигляді:

$$P'_x = P_x \cdot \cos \alpha + P_y \cdot \sin \alpha; \quad (1)$$

$$P'_y = P_y \cdot \cos \alpha - P_x \cdot \sin \alpha. \quad (2)$$

Розглянемо сили, що діють на розкочувальну головку у перерізі, що проходить через вісь обертання валка перпендикулярно супорту верстата (рис. 4).

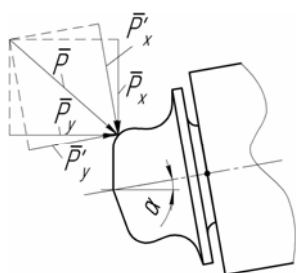


Рис. 3. Розкладання повного зусилля, що діє на валок вздовж осі обертання валка та вздовж осі обертання заготовки

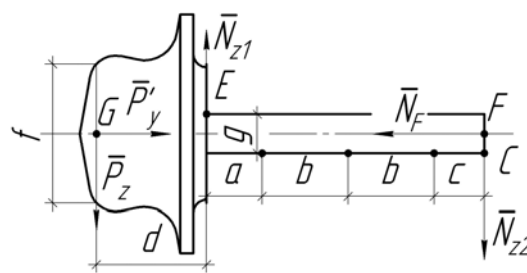


Рис. 4. Сили, що діють на розкочувальну головку у перерізі, що перпендикулярний супорту верстата

З рівнянь рівноваги знайдемо реакції поверхонь  $N_{z1}$  та  $N_{z2}$ :

$$N_{z1} = \frac{a + 2b + c + d}{a + 2b + c} \cdot P_z; \quad (3)$$

$$N_{z2} = \frac{d}{a + 2b + c} \cdot P_z. \quad (4)$$

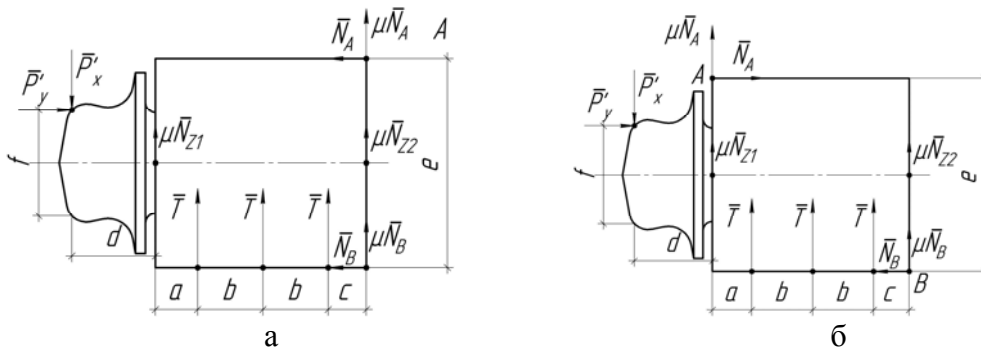


Рис. 5. Сили, що діють на розкочувальну головку у перерізі, що паралельний супорту верстата

У перерізі, що паралельний супорту верстата, в залежності від співвідношення  $P'_x$  та  $P'_y$  можливі два варіанти дії сил на корпус розкочувальної головки (рис. 5 а, б). Для обох випадків складено рівняння рівноваги і визначено складові зусилля. Для варіанту навантаження, що зображений на рис. 5, а, отримаємо такі співвідношення:

$$P'_x = 3T + \mu(N_A + N_B + N_{z1} + N_{z2}); \quad (5)$$

$$N_B = \frac{P'_y \cdot \left(\frac{e-f}{2}\right) + (P'_x - \mu P'_z) \cdot (d + a + 2b + c) - 3T(c + b)}{e}; \quad (6)$$

$$N_A = P'_y - \frac{P'_y \left(\frac{e-f}{2}\right) + (P'_x - \mu P'_z) \cdot (d + a + 2b + c) - 3T(c + b)}{e}. \quad (7)$$

Для другого варіанту навантаження (див. рис. 5, б) з рівнянь рівноваги отримаємо:

$$P'_x = 3T + \mu(N_A + N_B + N_{z1} + N_{z2}); \quad (8)$$

$$N_B = \frac{P'_y \left(\frac{e-f}{2}\right) + P'_x d + 3T(a + b) + \mu d P'_z}{e - \mu(a + 2b + c)}; \quad (9)$$

$$N_A = \frac{P'_y \left(\frac{e-f}{2}\right) + P'_x d + 3T(a + b) + \mu d P'_z}{e - \mu(a + 2b + c)} - P'_y. \quad (10)$$

І в першій і в другій схемі навантаження при забезпеченні коефіцієнта тертя  $\mu = 0,03 \dots 0,05$  введенням між поверхнями тертя графітного змащування при визначенні поперечного зусилля  $P'_x$  можна знехтувати другим доданком. Тоді, розписавши силу, з якою пружина діє на розкочувальну головку, отримаємо:

$$P'_x = 3C \cdot (l_n + \Delta l), \quad (11)$$

де  $C$  – жорсткість пружини;  $l_n$  – попередній стиск пружини при збиранні вузла;  $\Delta l$  – деформація пружини внаслідок дії поперечної сили.

Для розрахунку точок дотику заготовки до оправки і інструмента  $x_A$ ,  $x_B$  використаємо методику, що запропонована у роботі [3] з врахування, що відстань між оправкою та валком  $t$  є не постійною величиною, а шукається виходячи із рівняння (11). При цьому можливі три варіанти:

– сила  $P'_x$  менша за силу попереднього натягу пружин. Тоді деформація пружин  $\Delta l$  дорівнює нулю і задача визначення точок дотику набуває вигляду:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{x_B - t - R_M - R_n}{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}} = -\frac{x_A}{\sqrt{R_M^2 - x_A^2}}; \\ & \frac{x_B - t - R_M - R_n}{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}} \cdot \left[ x_B - \frac{s}{2} \times \right. \\ & \left. \times \cos \left( \arctg \frac{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}}{t + R_M + R - x_B} \right) \right] + \left[ \sqrt{R_M^2 - x_A^2} - R_M + \right. \\ & \left. + \frac{s}{2} \cdot \sin \left( \arctg \frac{\sqrt{R_M^2 - x_A^2}}{x_A} \right) - \frac{x_B - t - R_M - R_n}{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}} \times \right. \\ & \left. \times \left( x_A + \frac{s}{2} \cdot \cos \left( \arctg \frac{\sqrt{R_M^2 - x_A^2}}{x_A} \right) \right) \right] = -\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2} - \\ & \left. - h + R_n - \frac{s}{2} \cdot \sin \left( \arctg \frac{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}}{t + R_M + R - x_B} \right) \right]; t = t_0, \end{aligned} \right. \quad (12)$$

де  $R_M$ ,  $R_n$  – радіуси заокруглень оправки і інструмента;  $s$  – товщина заготовки;  $h$  – подача інструмента;  $t_0$  – початкова відстань між оправкою та інструментом;

– сила  $P'_x$  більша за силу попереднього натягу пружин, але менша за  $3C \cdot (l_H + l_x)$ , де  $l_x$  – максимальний хід пружини. Тоді деформація пружин  $\Delta l$  визначається з рівняння (11) і задача набуває вигляду:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{x_B - t - R_M - R_n}{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}} = -\frac{x_A}{\sqrt{R_M^2 - x_A^2}}; \\ & \frac{x_B - t - R_M - R_n}{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}} \cdot \left[ x_B - \frac{s}{2} \cdot \cos \left( \arctg \frac{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}}{t + R_M + R - x_B} \right) \right] + \\ & \left[ \sqrt{R_M^2 - x_A^2} - R_M + \frac{s}{2} \cdot \sin \left( \arctg \frac{\sqrt{R_M^2 - x_A^2}}{x_A} \right) - \frac{x_B - t - R_M - R_n}{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}} \times \right. \\ & \left. \times \left( x_A + \frac{s}{2} \cdot \cos \left( \arctg \frac{\sqrt{R_M^2 - x_A^2}}{x_A} \right) \right) \right] = -\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2} - h + R_n - \\ & \left. - \frac{s}{2} \cdot \sin \left( \arctg \frac{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}}{t + R_M + R - x_B} \right) \right]; \\ & \dots \end{aligned} \right.$$

$$\left. \begin{aligned}
 & \dots \\
 & t = t_0 + \left\{ 2 \cdot \sqrt{\frac{D^2}{4} - \left[ \frac{d}{2} - R_M - s + \left( R_M + \frac{s}{2} \right) \cdot \arcsin \frac{x_A}{R_M} \right]^2} \times \right. \\
 & \times \left( \frac{\sigma_o \cdot s^2}{4} - \frac{\sigma_o^3 \cdot R_M^2}{3 \cdot E^2} \right) / \left\{ x_B - x_A - \frac{s}{2} \cdot \left[ \cos \left( \arctg \frac{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}}{t + R_M + R_n - x_B} \right) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \cos \left( \arctg \frac{\sqrt{R_M^2 - x_A^2}}{x_A} \right) \right] - \frac{x_B - t - R_M - R_n}{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}} \cdot \left[ \sqrt{R_M^2 - x_A^2} - R_M + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2} + h - R_n + \frac{s}{2} \cdot \left[ \sin \left( \arctg \frac{\sqrt{R_M^2 - x_A^2}}{x_A} \right) + \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. + \sin \left( \arctg \frac{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}}{t + R_M + R_n - x_B} \right) \right] \right] \right\} \cdot \left[ \frac{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}}{t + R_M + R - x_B} \cdot \cos \alpha + \sin \alpha \right] / C - l_i \left. \right\} \cos \alpha;
 \end{aligned} \right. \quad (13)$$

– сила  $P'_x$  більша за силу  $3C \cdot (l_n + l_x)$ . Тоді деформація пружин  $\Delta l$  дорівнює  $l_x$  і задача набуває вигляду:

$$\left\{ \begin{aligned}
 & \frac{x_B - t - R_M - R_n}{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}} = - \frac{x_A}{\sqrt{R_M^2 - x_A^2}}; \\
 & \frac{x_B - t - R_M - R_n}{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}} \cdot \left[ x_B - \frac{s}{2} \times \right. \\
 & \left. \times \cos \left( \arctg \frac{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}}{t + R_M + R - x_B} \right) \right] + \left[ \sqrt{R_M^2 - x_A^2} - R_M + \right. \\
 & \left. + \frac{s}{2} \cdot \sin \left( \arctg \frac{\sqrt{R_M^2 - x_A^2}}{x_A} \right) - \frac{x_B - t - R_M - R_n}{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}} \times \right. \\
 & \left. \times \left( x_A + \frac{s}{2} \cdot \cos \left( \arctg \frac{\sqrt{R_M^2 - x_A^2}}{x_A} \right) \right) \right] = - \sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2} \\
 & - h + R_n - \frac{s}{2} \cdot \sin \left( \arctg \frac{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}}{t + R_M + R - x_B} \right); \\
 & t = t_0 + l_x.
 \end{aligned} \right. \quad (14)$$

Для реалізації всіх трьох варіантів була створена програма у додатку Maple 9. Результати розрахунку за цією програмою показані на рис. 6. При певній подачі  $h_1$  пружини починають стискатись, що призведе до збільшення зазору між валком та оправкою. Внаслідок цього осьова складова зусилля деформування різко зменшується, а зростання поперечної складової йде більш повільно.

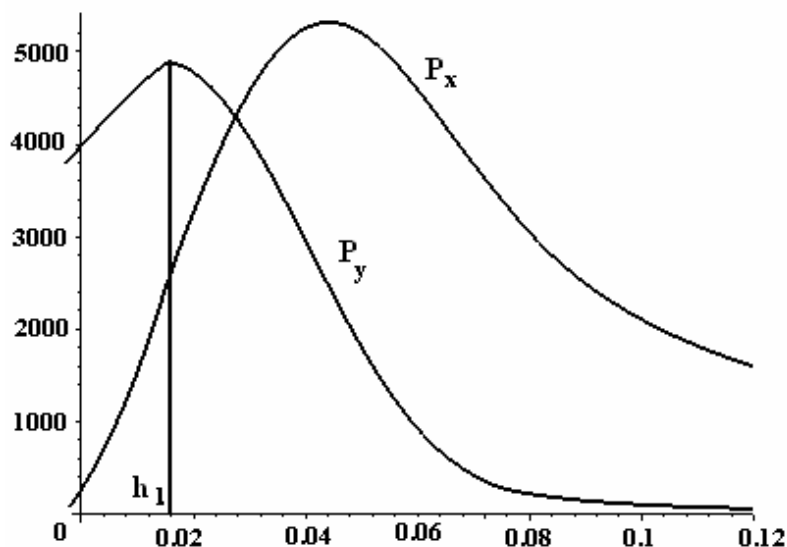


Рис. 6. Розрахунок осьової та поперечної складових повного зусилля із врахуванням зміни зазору між валком та оправкою внаслідок дії пружин

### ВИСНОВКИ

Запропоновано методику визначення зусилля деформування при ротаційній витяжці із врахуванням дії пружних елементів. При цьому розглянуто три можливі випадки: коли поперечна складова менша за силу попереднього натягу пружин, більша за неї, але менша за максимальну силу стиску пружин, що зумовлена їх максимальним ходом, і небажаний випадок, коли поперечна складова повного зусилля діє на інструмент без компенсації пружинами.

Запропонована методика визначення зусилля деформування реалізована у додатку Maple 9.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Матвійчук В. А. Розробка маловідходних процесів формування тонкостінних циліндричних деталей / В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, В. О. Краєвський // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ : ДДМА. – 2004. – С. 281–286.
2. Михалевич В. М. Математичне моделювання механіки формоутворення при холодному торцевому розкочуванні та ротаційній витяжці : монографія / В. М. Михалевич, В. О. Краєвський. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 188 с.
3. Краєвський В. О. Математична модель згинання смуги / В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, В. О. Краєвський // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ : ДДМА. – 2006. – С. 103–108.

Краєвський В. О. – канд. техн. наук, доц. ВНТУ;

Матвійчук В. А. – д-р техн. наук, проф. ВНАУ;

Михалевич В. М. – д-р техн. наук, проф. ВНТУ;

Краєвський С. О. – магістр ВНТУ.

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

ВНАУ – Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця.

E-mail: vkraevsky@mail.ru