

5. Зеленський А. Г. Варіант уточненої теорії згину однорідних фізично нелінійних пологих оболонок / А. Г. Зеленський // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Механіка. – 2001. – Т. 1, № 4. – С. 56–64.
6. Каудерер Г. Нелинейная механика / Г. Каудерер. – М., 1961. – 777 с.
7. Немиш Ю. Н. Напряженно-деформированное состояние тонких оболочек и пластин. Обобщенная теория. Обзор / Ю. Н. Немиш, И. Ю. Хома. // Прикл. механика – 1991. – 29, №11. – С. 3–27.
8. Немиш Ю. Н. О напряженном состоянии слоистой нелинейно упругой толстостенной сферической оболочки / Ю. Н. Немиш, О. И. Левчук. // Прикл. механика 1999. – 35, №12. – С. 26–32.
9. Плеханов А. В. Об одном асимптотическом методе построения теории изгиба пластин средней толщины / А. В. Плеханов, А. П. Прусаков. // Механика твердого тела. – 1976. – №3. – С. 84–90.
10. Понятовский В. В. Уравнения теории анизотропных пластинок / В. В. Понятовский // Исследование по упругости и пластичности. – Л., 1965. – №4. – С. 3–28.
11. Прусаков А. П. О построении уравнений изгиба двенадцатого порядка для трансверсально-изотропной пластины / А. П. Прусаков // Прикл. механика. – 1993. – Т. 29, № 12. – С. 51–58.
12. Хома И. Ю. Обобщенная теория анизотропных оболочек / И. Ю. Хома – К., 1986. – 170 с.
13. Цурпал И. А. Расчет элементов конструкций из нелинейно упругих материалов / И.А. Цурпал. – К., 1976. – 176 с.
14. Цурпал И. А. Расчет многосвязных слоистых и нелинейно упругих пластин и оболочек / И. А. Цурпал, Н. Г. Тамуров. – К., 1977. – 224 с.
15. Cicala P. Sulla teria elastica della plate sottile / P. Cicala // Giomgenio Civile. – 1959. – 97, № 4. – P. 238–256.
16. Reissner E. On a variotional theorem in elasticity / E. Reissner/ J. Math. and Phys. – 1950. – V. 33. – P. 90–95.

Надійшла до редколегії 12.12.08

УДК 621.774.35 (075.8)

О. Г. Гоман*, С. Р. Рахманов**, Н. В. Швайка**

* Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара

** Национальная металлургическая академия Украины

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРЕССОВАНИЯ ТРУБ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СМАЗКИ

Розглянуто осесиметричну задачу про двошарову течію робочих середовищ «метал-мастило» в кільцевому зазорі осередку деформації між матрицею та оправкою в рамках прийнятої гідродинамічної моделі процесу пресування труб. З'ясовано характер розподілу тиску металу в осередку деформації та контактних напружень на поверхні оправки, а також розраховано загальну силу опору в процесі пресування.

Введение. Технично-економические преимущества современных технологических процессов и оборудования для производства бесшовных труб из малопластичных материалов, легированных сталей и их сплавов методом прессования определили приоритеты в данной области. При этом в мировой практике широкое применение

© О. Г. Гоман, С. Р. Рахманов, Н. В. Швайка, 2009

находят процессы горячего прессования бесшовных труб, что наиболее эффективно при обработке давлением малопластичных и труднодеформируемых материалов.

Повышение эффективности процесса прессования, совершенствование технологии производства труб и оборудования, по мнению большинства исследователей [1;2;3], выдвигают весьма актуальные задачи по выбору решений, связанных с оптимальным управлением качеством, отработкой технологических характеристик, прогнозированием показателей стойкости технологического инструмента и надежности функционирования оборудования.

При прессовании бесшовных труб из нержавеющей стали и сплавов для уменьшения сил трения в очаге деформации и стабилизации технологического процесса преимущественно используются различные смазки, которые обеспечивают высокую чистоту и качество поверхности изготавливаемых путем прессования труб из малопластичных материалов. В качестве смазочного материала применяют различные технологические смазки: преимущественно порошки, смазочные шайбы, жидкую и стекловидную смазку и пр. При этом, на передний план выдвигается проблема выбора рациональных технологических параметров процесса прессования, неразрывно связанная с решением задачи о формировании необходимой смазочной пленки между заготовкой и рабочими инструментами (оправкой и матрицей).

Постановка задачи. Потребность в осуществлении технологического процесса прессования труб с относительно высокими темпами деформации металла без нарушения проектных геометрических размеров и сплошности изделия при выходе из контейнера, выдвигает проблему разработки принципиально новых математических и физических моделей процесса. Эти модели в основном базируются на развитии результатов известных фундаментальных исследований [1; 2].

По мнению большинства авторов, задача прессования бесшовных труб в общетеоретическом плане наиболее полно рассмотрена в [3;4]. Однако, несмотря на это, при отработке и анализе конкретных режимов и условий прессования бесшовных труб с применением специальных технологических смазок возникает ряд трудностей, обусловленных учетом физических особенностей реальных процессов.

Необходимо отметить, что в существующей литературе отсутствуют однозначные обобщающие рекомендации по выбору как рациональных технологических и геометрических параметров очага деформации, так и протекания самого процесса с учетом параметров и свойств смазочного слоя.

Ниже в работе предпринята попытка построить некоторую корректную математическую модель процесса прессования бесшовных труб. Благодаря этой модели становится возможным рассматривать различные схемы ввода технологических смазок в очаг деформации, наиболее полно соответствующие физическим и граничным условиям поставленной задачи прессования.

Основной целью данной работы является получение общих рекомендаций по выбору рациональных параметров процесса прессования для следующих схем: оправка – смазка – металл – матрица; оправка – металл – смазка – матрица.

Представления, заложенные в основу обобщенной гидродинамической модели, характерны и особенно эффективны при прессовании трубных изделий из трудно деформируемых материалов. Схема рассматриваемого процесса представлена на рис. 1: под действием пресштемпера 1, движущегося вдоль оси прессования с заданной скоростью \vec{V}_0 , смазка 2 с вязкостью μ_1 и металл 3 с вязкостью μ_2 выпрессовываются из контейнера 4 в кольцевой зазор, образованный матрицей 5 и цилинд-

рической оправкой (иглой) 6, образуя полу цилиндрическую трубу заданных геометрических размеров [6].

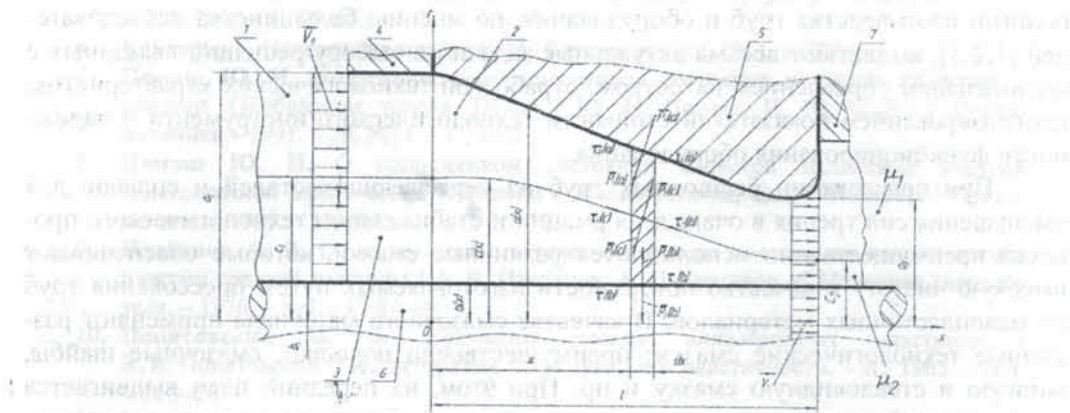


Рис. 1. Расчетная схема процесса прессования с учетом смазочной пленки

Математическая модель. В рамках принятой расчетной схемы двухслойное течение рабочих сред «металл – смазка» в кольцевом зазоре, образованном матрицей и оправкой, рассматривается как осесимметричное течение вязких несжимаемых жидкостей с соответствующими коэффициентами вязкости.

Для решения задачи процесса прессования на основе гидродинамической аналогии, воспользуемся системой дифференциальных уравнений Навье-Стокса с определенными предположениями и допущениями. Для осесимметричного движения рабочих сред в очаге деформации в указанной постановке будем иметь следующие уравнения:

$$\begin{cases} \frac{\partial p_1}{\partial x} = \mu_1 \left(\frac{\partial^2 v_{x1}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{x1}}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_{x1}}{\partial x^2} \right) \\ \frac{\partial p_2}{\partial x} = \mu_2 \left(\frac{\partial^2 v_{x2}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{x2}}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_{x2}}{\partial x^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

Будем предполагать, что, аналогично течению Пуазейля, давления $p_1(x)$ и $p_2(x)$ в каждом из слоев являются некоторыми функциями только переменного x в рассматриваемом сечении очага деформации, и так как эти величины должны совпадать на границе контакта слоев (при $r=c(x)$), то отсюда следует, что $p_1(x) = p_2(x) = p(x)$, то есть в рассматриваемой модели давление в каждом поперечном сечении постоянно и одинаково, как в слое металла, так и в слое смазки.

Уравнения неразрывности рабочих сред представим в виде интегральных законов сохранения расходов соответственно смазки и металла, а именно:

$$2\pi \int_{b(x)}^{c(x)} v_{x1}(x,r) r dr = Q_1 = const, \quad (2)$$

$$2\pi \int_{c(x)}^{a(x)} v_{x2}(x,r) r dr = Q_2 = const.$$

Предположим, что имеет место плавное изменение площади поперечного сечения очага деформации, занятого металлом и смазкой. Тогда, учитывая незначительное влияние изменения скорости по координате x , можно пренебречь производными

по сравнению с другими слагаемыми в правых частях системы (1).

В результате получим упрощенную систему дифференциальных уравнений в виде известных преобразований Пуазейля:

$$\begin{cases} \frac{\partial P_1}{\partial x} = \mu_1 \left(\frac{\partial^2 v_{x1}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{x1}}{\partial r} \right), \\ \frac{\partial P_2}{\partial x} = \mu_2 \left(\frac{\partial^2 v_{x2}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{x2}}{\partial r} \right). \end{cases} \quad (3)$$

Итак, гидродинамическую модель процесса прессования для двухслойного течения рабочих сред в кольцевом зазоре очага деформации можно представить как осесимметричное квазистационарное течение Пуазейля для каждой из сред, металла и смазки.

Решения дифференциальных уравнений (3) согласно [7;8] можно записать в виде:

$$\begin{cases} v_{x1}(x,r) = \frac{1}{4\mu_1} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) r^2 + A_1 \cdot \ln r + B_1, \\ v_{x2}(x,r) = \frac{1}{4\mu_2} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) r^2 + A_2 \cdot \ln r + B_2. \end{cases} \quad (4)$$

Полученное решение описывает распределение скоростей сопряженного двухслойного течения металла и смазки по поперечному кольцевому сечению очага деформации.

Кинематическими граничными условиями для определения постоянных $A_{1,2}$ и $B_{1,2}$ являются условия прилипания на матрицы (радиуса $r=a(x)$) и внутренней оправке (радиуса $r=b(x)$), а также условие равенства силовых параметров на сопряженной границе контакта слоев смазки и металла: $v_{x1} = v_{x2} = u(x)$ при $r=c(x)$ (здесь $u(x)$ – скорость движения смазки и металла на границе контакта $r=c(x)$). При этом необходимо отметить, что неизвестными являются как скорость $u(x)$ движения слоев на границе, так и радиус границы $c(x)$ в пределах сопряженных зон очага деформации.

С учетом указанных граничных условий, из уравнений (4) получим:

$$v_{x1}(x,r) = \frac{1}{4\mu_1} \frac{\partial p}{\partial x} (r^2 - b^2) + A_1 \ln \frac{r}{b}, \quad (5)$$

$$v_{x2}(x,r) = \frac{1}{4\mu_2} \frac{\partial p}{\partial x} (r^2 - a^2) + A_2 \ln \frac{r}{a}. \quad (6)$$

Из условия сопряжения слоев при $r=c(x)$ можно выразить коэффициенты A_1 и A_2 через величину $u(x)$ и градиент давления:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{u - \frac{1}{4\mu_1} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} (c^2 - b^2)}{\ln \frac{c}{b}}, \dots A_2 = \frac{-u - \frac{1}{4\mu_2} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} (a^2 - c^2)}{\ln \frac{a}{c}}. \end{cases} \quad (7)$$

Из условия сохранения сплошности очага деформации, определяем расходы рабочих сред через соответствующие поперечные сечения соответственно в слоях металла и смазки на границах раздела слоев в виде:

$$Q_1 = 2\pi \cdot \int_b^c v_{x1} r dr = \frac{f_1}{\mu_1} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + g_1 u, \quad (8)$$

$$Q_2 = 2\pi \cdot \int_b^c v_{x2} r dr = \frac{f_2}{\mu_2} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + g_2 u, \quad (9)$$

где введены обозначения:

$$f_1 = \frac{\pi}{8} (c^2 - b^2) \frac{c^2 - b^2 - (c^2 + b^2) \ln \frac{c}{b}}{\ln \frac{c}{b}}, \quad g_1 = \frac{\pi}{\ln \frac{c}{b}} \left[c^2 \cdot \ln \frac{c}{b} - \frac{1}{2} \cdot (c^2 - b^2) \right],$$

$$f_2 = \frac{\pi}{8} (a^2 - c^2) \frac{a^2 - c^2 - (a^2 + c^2) \ln \frac{a}{c}}{\ln \frac{a}{c}},$$

$$g_2 = \frac{\pi}{\ln \frac{a}{c}} \left[\frac{1}{2} (a^2 - c^2) - c^2 \cdot \ln \frac{a}{c} \right].$$

С другой стороны, если скорость движения прессового инструмента (пресштемпеля) V_0 задана и известна толщина смазки под пресштемпелем ($a_1 - c_1$), то при $x=0$ величины расходов Q_1 и Q_2 известны и соответственно равны:

$$\begin{cases} Q_1 = \pi (c_1^2 - b_1^2) V_0, \\ Q_2 = \pi (a_1^2 - c_1^2) V_0. \end{cases} \quad (10)$$

В этом случае на выражения (8) и (9) можно смотреть как на систему уравнений для определения градиента давления и скорости $u(x)$. Разрешая эту систему, получим:

$$u(x) = \frac{\frac{\mu_2 Q_2}{f_2} - \frac{\mu_1 Q_1}{f_1}}{\frac{\mu_2 g_2}{f_2} - \frac{\mu_1 g_1}{f_1}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial p(x)}{\partial x} = \frac{\mu_1 \cdot \mu_2}{f_1 \cdot f_2} \frac{Q_1 g_2 - Q_2 g_1}{\frac{\mu_2 g_2}{f_2} - \frac{\mu_1 g_1}{f_1}} \quad (12)$$

Выражения (11) и (12) определяют скорость $u(x)$ и градиент давления через неизвестную пока функцию $c(x)$, определяющую форму границы раздела между слоями металла и смазки.

Для определения этой последней неизвестной геометрической величины $c(x)$ имеем условие равенства касательных напряжений на границе контакта металла со слоем смазки

$$\tau_{xr}^1 = \tau_{xr}^2 \quad \text{при } r(x) = c(x), \quad (13)$$

которое имеет вид

$$\mu_1 \left. \frac{\partial v_{x1}}{\partial r} \right|_{r=c(x)} = \mu_2 \left. \frac{\partial v_{x2}}{\partial r} \right|_{r=c(x)}, \quad (14)$$

Используя выражения (5) и (6), из (14) получим соотношение

$$u(x) \left(\frac{\mu_1}{\ln \frac{c}{b}} + \frac{\mu_2}{\ln \frac{a}{c}} \right) = \frac{1}{4} \frac{\partial p(x)}{\partial x} \cdot \frac{(c^2 - b^2) \ln \frac{a}{c} - (a^2 - c^2) \ln \frac{c}{b}}{\ln \frac{c}{b} \cdot \ln \frac{a}{c}} \quad (15)$$

Подставив сюда выражения для $u(x)$ и $\frac{\partial p(x)}{\partial x}$ из (11) и (12), получим уравнение, которое следует рассматривать как уравнение для определения радиуса границы раздела $r=c(x)$ между слоями смазки и металла при заданной форме границы матрицы $r=a(x)$. Преобразуя выражение (15), окончательно находим необходимое трансцендентное уравнение для определения этой границы $c(x)$ в виде:

$$\begin{aligned} & (\mu_2 Q_2 f_1 - \mu_1 Q_1 f_2) \left(\mu_1 \cdot \ln \frac{a}{c} + \mu_2 \cdot \ln \frac{c}{b} \right) = \\ & = \frac{1}{4} \mu_1 \mu_2 (Q_1 g_2 - Q_2 g_1) \left[(c^2 - b^2) \ln \frac{a}{c} - (a^2 - c^2) \ln \frac{c}{b} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

Коэффициент «вязкости» в данной постановке задачи определялся графическим дифференцированием известных механических характеристик напряженно-деформированного состояния металла [9; 10; 11; 12].

На кривых, приведенных на рис. 2, представлено изменение энергосиловых параметров в очаге деформации при горячем прессовании бесшовных труб с учетом слоя смазки.

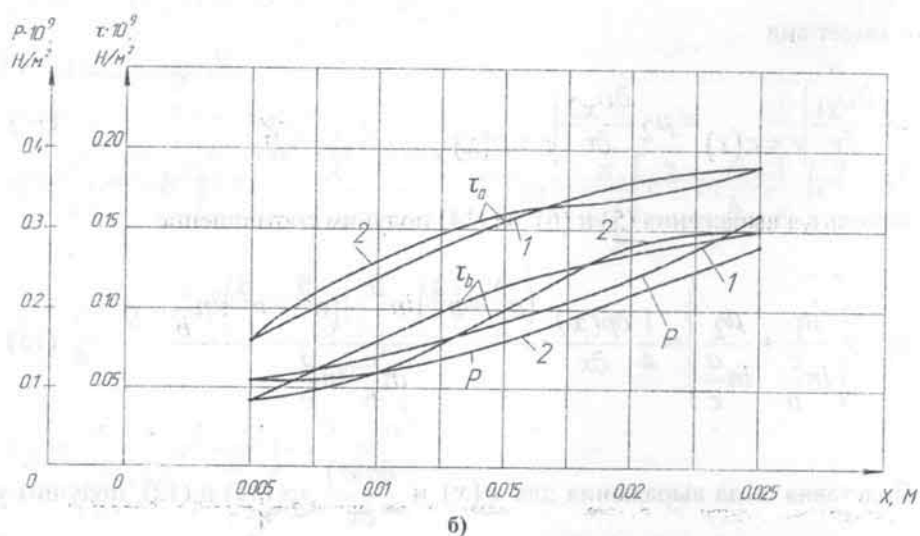
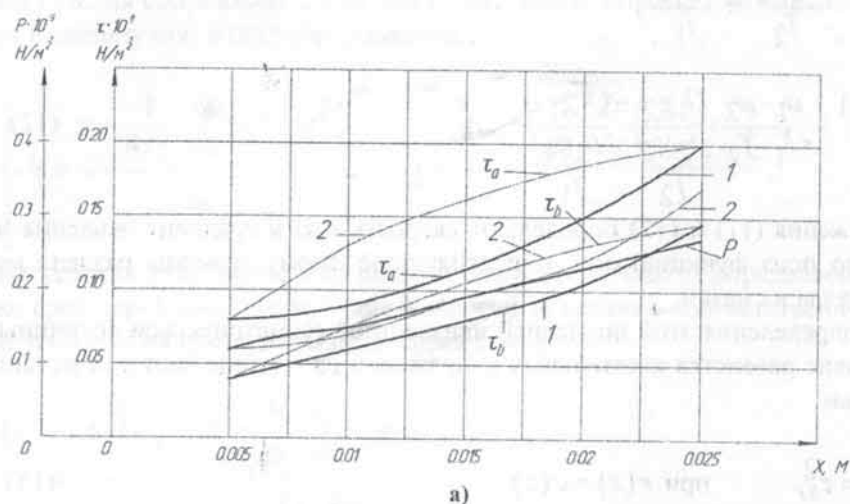


Рис. 2. Распределение давления и касательных напряжений в очаге деформации при прессовании труб с учетом слоя смазки для различных форм образующей матрицы: а) 1–тор, 2–парабола, б) 1–конус, 2–кубическая парабола, ($V_0=0,2$ м/с, материал X18H10T, оправка $\varnothing 110$, гильза $\varnothing 140 \times 15$)

При этом в расчетах выявлен значительный рост давления металла и касательных напряжений по всей длине очаге деформации. Необходимо отметить, что характер распределения касательных напряжений на матрице и оправке, кроме всего прочего, существенно зависит от формы образующей рабочего участка матрицы. Рост касательных напряжений на оправке на 20-30 % выше напряжений на матрице указывает на характерные тяжело нагруженные условия функционирования технологических инструментов и оборудования в процессе прессования труб.

Характер распределения касательных напряжений и давления металла в очаге деформации указывает на необходимость отработки технологического процесса и рациональных схем ввода технологической смазки. При этом, путем математического моделирования становится возможным прогнозирование и отработка рациональных технологических процессов с применением различных схем прессования. Моделирование реальных процессов прессования труб по двум вышеприведенным наиболее распространенным схемам прессования бесшовных труб позволяет установить необходимые параметры исходной заготовки, режимы ввода смазки и параметры матрицы для ведения интенсивного технологического процесса.

Использование результатов работы создает реальные возможности для отработки режимов ввода смазки на этапе проектирования технологического процесса и, тем самым, для реализации рациональных режимов нагружения матрицы и оправки в ходе прессования бесшовных труб, а также позволяет добиться существенного повышения качества производимых труб.

Выводы. В рамках принятой гидродинамической модели рассмотрено осесимметричное двухслойное течение рабочих сред «металл – смазка» в кольцевом зазоре очага деформации, образованном матрицей и оправкой.

Установлен характер распределения контактных касательных напряжений и давления металла в очаге деформации с учетом двухслойного течения рабочих сред.

Благодаря предложенному методу математического моделирования двухслойного течения рабочих сред появляется возможность прогнозирования и отработки процессов прессования бесшовных труб с применением различных схем ввода технологических смазок.

На базе гидродинамической модели задачи предоставляется возможность отработки рациональных режимов нагружения матрицы и оправки на соответствующих этапах процесса прессования бесшовных труб, что позволяет добиться увеличения стойкости технологических инструментов (оправок и матриц) и существенного повышения качества труб.

Библиографические ссылки

1. Данилов Ф.А. Горячая прокатка и прессование труб / Ф.А. Данилов, А.З. Глейберг, В.Г. Балакин. – М., 1972. – 576 с.
2. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Гун Г.Я. – М., 1980. – 456 с.
3. Грудев А.П. Теория и смазки при обработке металлов давлением: Справочник / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. – М., 1982. – 312 с.
4. Исаченко Е.И. Контактное трение и смазка при обработке металлов давлением / Е.И. Исаченко. – М., 1978. – 208 с.
5. Борисов С.И. Аналитический метод определения усилия при прессовании стальных труб. / С. И. Борисов, А.Е. Притоманов. // Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением. – М., 1964. – С.350–355.
6. Гун Г.Я. Прессование алюминиевых сплавов / Г.Я. Гун, В.И. Яковлев, В.А. Прудковский. – М., 1974. – 336 с.
7. Залесский В.И. Течение вязкой жидкости через коническую щель / В.И. Залесский, Б.С. Векшин // Изв. вузов. Черн. Metallургия, – 1974, – №1. – С. 104–107.
8. Колмогоров Г.Л. Вопросы гидродинамической смазки при прессовании материалов жидкостью высокого давления / Г.Л. Колмогоров, Т.Е. Мельников. // Физика и техника высоких давлений. – 1981, – №3. – С. 91–96.

9. Kanjaidu V.B. An Hydrodinamic Model of Hydrodinamic Extrusion / V.B. Kanjaidu // Ibid, 1966, 5, №2. – P.171–174.
10. Гуляев Ю.Г. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением / Ю.Г. Гуляев, С.А. Чукмасов, А.В. Губинский. – К., 1986. – 240 с.
11. Сафаров Ю.С. К вопросу выбора оптимальной геометрии инструмента при прессовании. / Ю.С. Сафаров, В.И. Гаращенко // Кузнечно-штамповочное производство, – 1971, №12. – С.8–11.
12. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник, 2-е изд. / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М., 1983. – 352 с.

Надійшла до редколегії 10.10.08

УДК 621.774.35 (535.5)

С. Р. Рахманов *, И. Г. Нестерук **

* Национальная металлургическая академия Украины

** Институт гидродинамики НАН Украины

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОБТЕКАНИЯ ОПРАВКИ МЕТАЛЛОМ НА ПРОШИВНОМ СТАНЕ ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА

Наведено результати дослідження технологічного процесу прошивки суцільних циліндричних заготовок у порожнині гільзи на основі моделі гідродинамічної аналогії. Визначено енергосилові параметри та функціонал осьової сили опору потоку прошивного металу. Запропоновано умови мінімізації функціоналу осьового опору в осередку деформації.

Введение. Технологический процесс производства бесшовных труб на прошивном стане трубопрокатного агрегата (ТПА) предусматривает прошивку отверстия в предварительно нагретой сплошной цилиндрической трубной заготовке 1 осесимметричной оправкой 2 определенной геометрической формы посредством рабочих валков 3 (рис. 1.) [1; 2].

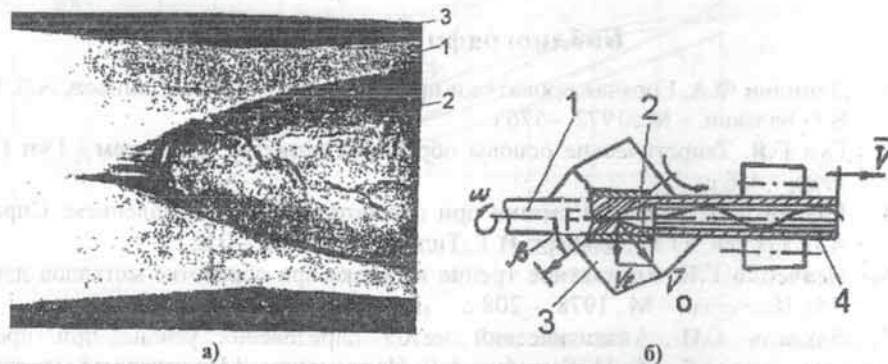


Рис. 1. Мгновенный очаг деформации а) и процесс прошивки б) заготовки на прошивном стане ТПА

Динамические особенности технологического процесса прошивки заготовки в вязкопластическом состоянии между валками и оправкой определенно напоминают гидродинамические явления, поэтому для количественной оценки этого процесса, для