

УДК 621.774.35 (075.8)

С.Р. Рахманов

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ

Аннотация. Решена задача о прессовании биметаллических труб путем математического моделирования динамики процессов и движения слоев биметалла и металла в кольцевом зазоре очага деформации, между матрицей и оправкой. Выявлены некоторые особенности формирования слоев биметалла и металла в очаге деформации. Определены изменения энергосиловых и динамических параметров очага деформации при прессовании биметаллических труб с учетом формы рабочей поверхности технологического инструмента.

Ключевые слова. Динамика, деформация, биметаллическая труба, матрица, оправка прессование.

Введение. Приоритет в области производства бесшовных биметаллических труб из сочетания различных материалов (стали и их сплавы) определен рядом преимуществ технико-экономических показателей современных технологических процессов прессования [1,2].

Необходимо отметить, что широкое применение в мировой практике находит процесс горячего прессования биметаллических труб. Данный процесс часто применяется при производстве многослойных труб из малопластичных и труднодеформируемых материалов.

Целью работы. Целью данной работы является получение рекомендаций по выбору рациональных параметров процесса и динамической модели для наиболее распространенных схем прессования биметаллических труб: "оправка – биметалл – металл – матрица" и "оправка – металл – биметалл – матрица".

Постановка задачи. Повышение эффективности производства биметаллических труб совершенствованием технологии прессования и прессового оборудования, выдвигает весьма перспективные задачи по принятию кардинальных решений, связанных с оптимальным управлением качеством выпускаемой продукции [3, 4].

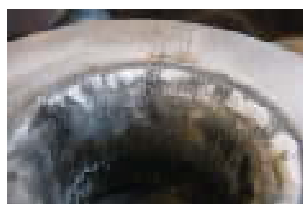
Прогнозирование показателей качества биметаллических труб и

© Рахманов С.Р., 2010

биметаллических соединений, а так же повышение эксплуатационной стойкости технологических инструментов (матриц и игл) и надежности функционирования оборудования, в данных условиях, занимает передовое место.

Анализ литературных источников. Отработка существующих и разработка новых технологических процессов производства биметаллических труб, в рамках поставленной задачи, определенно указывает на создание корректных математических моделей, а иногда и привлечение нетрадиционных реологий [5, 6]. Создание адекватной модели современного технологического процесса прессования биметаллических труб выдвигает определенные предпосылки для достаточно полной и всесторонней отработки влияния различных факторов, параметров и режимов прессования на соответствующих этапах процессов прессования труб.

Условия формирования энергосиловых параметров очага деформации при прессовании биметаллических труб вызывают тяжело нагруженные режимы нагружения и преждевременный износ технологических инструментов (матрицы, иглы, контейнера). При прессовании биметаллических труб для уменьшения сил трения в очаге деформации из компонентов различных сталей и их сплавов, преимущественно, используется специальная технологическая смазка [6, 7]. Следовательно, высокое качество поверхности прессованных биметаллических труб из малопластичных материалов и износостойкость технологического инструмента обеспечивается также применением различных способов подачи и вариаций технологических смазок. В промышленных условиях для этой цели чаще всего применяют специальные порошки, смазочные шайбы, жидкую или стекловидную смазку (рис. 1).



а)



б)

Рисунок 1 - Картины износа матрицы а) и иглы б) профильного прессы

Помимо всего, на передний план выдвигается проблема выбора

устойчивых параметров процесса прессования, что неразрывно связано с решением задачи о формировании необходимого биметаллического слоя между металлом и рабочими инструментами (иглой и матрицей).

Возможности прессования биметаллических труб с относительно высокими темпами деформации, без нарушения их требуемых геометрических размеров и без разрушения сплошности биметаллического изделия при выходе из очага деформации, обуславливают разработку принципиально новых реологий прессуемых материалов, математических и нетрадиционных физических моделей технологического процесса (рис. 2).



Рисунок 2 - Тимплеты прессованных биметаллических труб с некоторыми нарушениями сплошности биметаллического слоя

Несмотря на это, при разработке и анализе конкретных задач, требующих учета динамических особенностей реальных процессов прессования биметаллических труб и физико-механических свойств материалов биметаллических соединений, на базе фундаментальной теории пластичности возникает ряд трудностей математического характера.

Отметим, что рядом исследователей, несколько в иной постановке, в работах [2, 4], рассмотрены некоторые частные задачи технологии производства биметаллических труб. Необходимо отметить, что в существующей литературе отсутствуют однозначные обобщающие рекомендации по определению рациональных режимов прессования и выбору параметров очага деформации. Особенно сложным является учет динамических особенностей движения двухслойного биметаллического потока металла в ограниченном объеме очага деформации и кольцевом зазоре между технологическими инструментами

Необходимо углубление знаний о процессах совместной деформации разнородных металлов и природе их совместного функционирования в очаге деформации. Ниже, в работе, сделана попытка получить относительно корректную динамическую модель

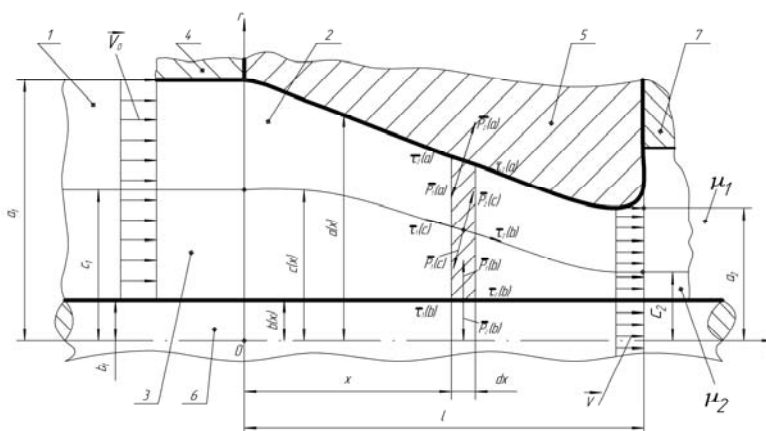
процесса прессования биметаллических труб на базе гидродинамической аналогии, и приведены некоторые выкладки по данному вопросу.

При этом, процесс прессования биметаллических труб рассматривается в уточненном виде, что соответствует выбранной вязкопластической реологии модели, физическим и динамическим граничным условиям очага деформации в рамках поставленной задачи.

Решение задачи. Физические представления, заложенные в основу реологии прессуемых материалов и обобщенной гидродинамической модели, характерны режимам прессования и адекватны условиям стесненного очага деформации. В частности это имеет место при производстве двухслойных труб из труднодеформируемых материалов в сочетании с биметаллом в условиях выбранной расчетной схемы (рис. 3).



а)



б)

Рисунок 3 - Тимплеты биметаллических заготовок а) и расчетная схема процесса прессования из биметаллической заготовки б): 1 – пресс-штемпель; 2 – биметаллический слой; 3 – металлический слой; 4 – контейнер; 5 – матрица; 6 – игла (оправка); 7 – матрицедержатель

Процесс прессования двухслойных биметаллических труб на

профильном прессе преимущественно выполняется в следующем порядке. Под действием пресс-штемпеля 1, движущегося вдоль оси прессования с заданной скоростью V_0 , биметалл 2 "вязкости" μ_1 , и металл 3, "вязкости" μ_2 , впрессовывается из контейнера 4 в кольцевой зазор, образованный матрицей 5 и цилиндрической иглой (оправкой) 6, формируется в цилиндрическую биметаллическую трубу (гильзу), заданных геометрических размеров.

Следовательно, в рамках нетрадиционной реологии, гидродинамической модели очага деформации и принятой расчетной схемы, рассмотрим осесимметричное двухслойное течение биметалла и металла, с соответствующими коэффициентами "вязкости", в кольцевом зазоре, между матрицей и оправкой. Соответствующие коэффициенты "вязкости" биметалла и металла определяются графическим дифференцированием механических характеристик материалов слоев [8].

Для исследования динамических процессов при прессовании биметаллических труб, в рамках поставленной задачи, выбираем гидродинамическую двухслойную модель, что позволяет, в дальнейшем, воспользоваться системой дифференциальных уравнений Навье – Стокса с известными предположениями и допущениями, согласно [9, 11, 12]. Отметим, что, при строгости соблюдения осесимметричности процесса движения слоев металла и биметалла (рабочих сред) в очаге деформации, в указанной постановке задачи, имеем следующую систему уравнений

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

Из анализа системы дифференциальных уравнений (1) следует, что градиент давления в рассматриваемом сечении очага деформации является только функцией выбранного переменного, координаты x . Следовательно, при этом, уравнения неразрывности следует составить в виде интегральных законов сохранения расходов, соответственно, слоев биметалла и металла в кольцевом зазоре очага деформации. Тогда, из закона сохранения секундных расходов слоев биметалла и металла в кольцевом зазоре между инструментами, и условий неразрывности очага деформации в процессе прессования биметаллических двухслойных труб, запишем

$$2\pi \int_{b(x)}^{c(x)} v_{x1}(x,r) r dr = Q_1, \quad 2\pi \int_{c(x)}^{a(x)} v_{x2}(x,r) r dr = Q_2. \quad (2)$$

Предположим плавное изменение площади поперечного сечения очага деформации, занятого металлом и биметаллом. Несмотря на строгость зависимости $v_{x1,2}$, как от координаты x , так и от радиальных размеров очага деформации, учтем незначительное влияние изменения скорости по соответствующей радиальной координате. Очевидно, в данном случае, пренебрегая производной $\frac{\partial^2 v_{x1,2}}{\partial x^2}$ по сравнению с другими слагаемыми правой части, преобразуем систему дифференциальных уравнений (1). Откуда следует, что рассматриваемую динамическую модель процесса, для характерного двухслойного течения рабочих сред, в кольцевом зазоре сечения очага деформации, можно представить как квазистационарное течение.

В рамках гидродинамической аналогии задачи, для процесса прессования биметаллических труб, имеем адаптированную систему дифференциальных уравнений, в виде преобразований

$$\frac{\partial p_1}{\partial x} = \mu_1 \left(\frac{\partial^2 v_{x1}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{x1}}{\partial r} \right), \quad \frac{\partial p_2}{\partial x} = \mu_2 \left(\frac{\partial^2 v_{x2}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{x2}}{\partial r} \right). \quad (3)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (3), исходя из гидродинамической аналогии процесса течения металла и биметалла, в силу вышеизложенного, представим, согласно [7, 8], в виде

$$v_{x1}(x,r) = \frac{1}{4\mu_1} \left(\frac{\partial p_1}{\partial x} \right) r^2 + A_1 \ln r + B_1, \quad v_{x2}(x,r) = \frac{1}{4\mu_2} \left(\frac{\partial p_2}{\partial x} \right) r^2 + A_2 \ln r + B_2. \quad (4)$$

Уравнения (4) характеризуют скорости сопряженного гидродинамического течения слоев металла и биметалла, в очаге деформации, в процессе прессования. Кинематические и граничные условия для определения постоянных $A_{1,2}$ и $B_{1,2}$ - есть характерные условия прилипания биметалла и металла к технологическим инструментам. Соответственно, на матрице радиуса $r = a(x)$, и внутренней оправке (игле) радиуса $r = b(x)$, и условия равенства энергосиловых параметров на сопряженных границах контакта слоев будут представлены, в виде

$$v_{x1} = v_{x2} = u(x), \text{ при } r = c(x).$$

Здесь $u(x)$ – скорость движения сопряженных границ биметалла и металла в рассматриваемом сечении x очага деформации, радиус которого равен $c(x)$.

Необходимо отметить, что неизвестными являются как скорость движения границ $u(x)$, так и радиус границы $c(x)$, в рассматриваемом сечении очага деформации, в пределах сопряженных зон, при прессовании биметаллической трубы. Тогда, из системы уравнений (4), с учетом граничных условий задачи для сопряженных зон металла и биметалла, скорости движения слоев в очаге деформации, соответственно, определяются, в виде

$$v_{x1}(x, r) = \frac{1}{4\mu_1} \frac{\partial p_1}{\partial x} (r^2 - b^2) + A_1 \ln \frac{r}{b}; \quad (5)$$

$$v_{x2}(x, r) = \frac{1}{4\mu_2} \frac{\partial p_2}{\partial x} (r^2 - a^2) + A_2 \ln \frac{r}{a}. \quad (6)$$

Следовательно, путем несложных преобразований из системы уравнений (5) и (6), соответственно, находим A_1 и A_2 . С учетом действительных условий процесса прессования, и особенностей двухслойного течения металла и биметалла, на границе раздела сопряженных зон металла и биметалла радиуса $c(x)$, имеем

$$A_1 = \frac{u - \frac{1}{4\mu_1} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x} (c^2 - b^2)}{\ln \frac{c}{b}}; \quad A_2 = \frac{-u - \frac{1}{4\mu_2} \cdot \frac{\partial p_2}{\partial x} (a^2 - c^2)}{\ln \frac{a}{c}}; \quad B_1 = 0; \quad B_2 = 0. \quad (7)$$

Из условия неразрывности потока металла и биметалла находим действительные расходы слоев через поперечные сечения очага деформации. Очевидно, для слоев металла и биметалла, соответственно, на границах их раздела, получим следующее

$$Q_1 = 2\pi \int_b^c v_{x1} r dr = \frac{f_1}{\mu_1} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x} + g_1 u, \quad (8)$$

$$Q_2 = 2\pi \int_b^c v_{x2} r dr = \frac{f_2}{\mu_2} \cdot \frac{\partial p_2}{\partial x} + g_2 u, \quad (9)$$

где

$$f_1 = \frac{\pi}{8}(c^2 - b^2) \frac{c^2 - b^2 - (c^2 + b^2) \ln \frac{c}{b}}{\ln \frac{c}{b}}, \quad f_2 = \frac{\pi}{8}(a^2 - c^2) \frac{a^2 - c^2 - (a^2 + c^2) \ln \frac{a}{c}}{\ln \frac{a}{c}},$$

$$g_1 = \frac{\pi}{\ln \frac{c}{b}} \left[c^2 \ln \frac{c}{b} - \frac{1}{2}(c^2 - b^2) \right], \quad g_2 = \frac{\pi}{\ln \frac{a}{c}} \left[\frac{1}{2}(a^2 - c^2) - c^2 \ln \frac{a}{c} \right].$$

Если скорость движения прессового инструмента (пресс-штемпеля) \vec{V}_O задана и известна толщина биметалла под пресс-штемпелем $(a_1 - c_1)$, то при $x = 0$, величины расходов слоев биметалла и металла Q_1 и Q_2 , соответственно, известны и равны

$$Q_1 = \pi(c_1^2 - b_1^2)v_0, \quad Q_2 = \pi(a_1^2 - c_1^2)v_0. \quad (10)$$

Для определения неизвестных, кинематических $u(x)$, и геометрических $c(x)$, параметров очага деформации воспользуемся динамическими условиями взаимодействия на границе контакта металла со слоем биметалла в очаге деформации. На границе раздела сопряженных зон биметаллического соединения, при некоторых требованиях технических условий об отсутствии скольжения (расслоения), принимаем, что должны быть равны по модулю и противоположны по направлению соответствующие давления и касательные напряжения между слоями металла и биметалла. По предположению того, что наклон образующей границы контакта биметалла и металла к оси прокатки является малым ($c'(x) \ll 1$), то вышеуказанное условие сводится к следующим равенствам

$$p_1 = p_2 \quad \text{при} \quad r(x) = c(x), \quad (11)$$

$$\text{и} \quad \tau_{xr}^1 = \mu_1 \left. \frac{\partial v_{x1}}{\partial r} \right|_{r=c(x)}, \quad \tau_{xr}^2 = \mu_2 \left. \frac{\partial v_{x2}}{\partial r} \right|_{r=c(x)} \quad \text{при} \quad r(x) = c(x). \quad (12)$$

Поскольку, в рамках рассматриваемой модели очага деформации, давление, в рассматриваемом сечении x , постоянно как по толщине металла, так и по толщине биметалла, то следует, что давление одинаково по всему поперечному сечению двухслойной среды $p_1(x) = p_2(x) = p(x)$. Очевидно, что это есть необходимое, но недостаточное условие для решения задачи.

Следовательно, из системы уравнений (8) и (9) определяется

скорость границы контакта биметалла и металла $u(x)$ и общий для всего процесса двухслойного течения в очаге деформации градиент давления $\frac{\partial p(x)}{\partial x}$, в виде

$$\frac{\partial p(x)}{\partial x} = \frac{\mu_1 \mu_2}{f_1 f_2} \frac{Q_1 g_2 - Q_2 g_1}{\frac{\mu_2 g_2}{f_2} - \frac{\mu_1 g_1}{f_1}}, \quad (13)$$

$$u(x) = \frac{\frac{\mu_2 Q_2}{f_2} - \frac{\mu_1 Q_1}{f_1}}{\frac{\mu_2 g_2}{f_2} - \frac{\mu_1 g_1}{f_1}}. \quad (14)$$

Необходимые и достаточные условия решения задачи динамики аналогии представлены равенством касательных напряжений на границе контакта сопряженных зон биметалла и металла, по известной гипотезе Ньютона согласно [4, 5, 7], в виде

$$\mu_1 \frac{\partial v_{x1}}{\partial r} \Big|_{r=c(x)} = \mu_2 \frac{\partial v_{x2}}{\partial r} \Big|_{r=c(x)} \quad (15)$$

Используя, соответственно, выражения (5), (6) и, принимая во внимание то, что $p_1(x) = p_2(x) = p(x)$, из уравнения (15) получим соотношение

$$u(x) \left(\frac{\mu_1}{\ln \frac{c}{b}} + \frac{\mu_2}{\ln \frac{a}{c}} \right) = \frac{1}{4} \frac{\partial p(x)}{\partial x} \frac{(c^2 - b^2) \ln \frac{a}{c} - (a^2 - c^2) \ln \frac{c}{b}}{\ln \frac{c}{b} \ln \frac{a}{c}}. \quad (16)$$

Поскольку $u(x)$ и $\frac{\partial p(x)}{\partial x}$ известны и, соответственно, определяются из (14) и (15) то, уравнение (17) следует рассматривать как уравнение для определения зон раздела, сопряженных границ слоев $r=c(x)$ при соответствующем парном течении биметалла и металла в кольцевом зазоре очаге деформации.

Окончательно преобразуя выражение (16) запишем необходимое уравнение для определения границы раздела биметалла с металлом, в виде

$$\begin{aligned} & (\mu_2 Q_2 f_1 - \mu_1 Q_1 f_2) \left(\mu_1 \ln \frac{a}{c} + \mu_2 \ln \frac{c}{b} \right) = \\ & = \frac{1}{4} \mu_1 \mu_2 (Q_1 g_2 - Q_2 g_1) \left[(c^2 - b^2) \ln \frac{a}{c} - (a^2 - c^2) \ln \frac{c}{b} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Из решения уравнения (17), с учетом соответствующих коэффициентов (8) и (9) определяем характер формирования границы слоев металла и биметалла биметаллической трубы в процессе прессования на профильном прессе.

На рис. 4 показан характер изменения энергосиловых (динамические) параметров очага деформации при прессовании биметаллических труб на профильном прессе 16,5 МН.

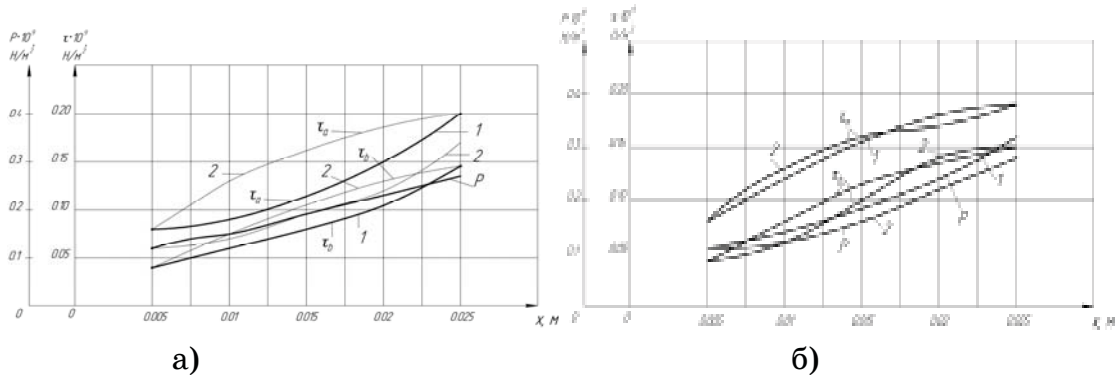


Рисунок 4 - Распределение давления и касательных напряжений на оправке и матрице при прессовании биметаллических труб диаметром 66Ч8,0 (заготовка 135Ч42,5Ч400, сталь 10 +0X18H10T): а) $V_0=0.25$ м/с; 1 – конус, 2 – кубический параболоид; б) $V_0=0.25$ м/с; 1 – конус; 2 – кубический параболоид

Из анализа кривых (рис. 6) видно, что значительный рост динамической составляющей давления металла и касательных напряжений наблюдается по всей длине очага деформации. Особенно необходимо отметить, что распределение давления металла и касательных напряжений на матрице и оправке очага деформации существенно зависит как от формы образующей рабочего участка матрицы, так и соотношения параметров слоев и механических свойств металла и биметалла. Рост касательных напряжений на поверхности иглы (оправки), определенно, выше напряжений на матрице, что указывает на характерные тяжело нагруженные условия функционирования технологических инструментов в процессе прессования биметаллических труб.

Характер распределения контактных касательных напряжений и давления металла в очаге деформации указывает на необходимость рационального выбора параметров слоев биметалла с металлом и их сочетания в исходной заготовке. Кроме всего, на распределение контактных касательных напряжений и давления металла в очаге

деформации существенно влияет форма образующей рабочей поверхности матрицы. Из анализа рассматриваемой модели видно, что процесс прессования биметаллических труб, наиболее эффективно, реализуется на матрице с образующей, выполненной в виде кубической параболы.

Путем математического моделирования процессов прессования представляется определенная возможность для прогнозирования технологии и отработки реальных режимов прессования бесшовных биметаллических труб. Отметим, что моделирование реальных режимов прессования биметаллических труб, по двум, вышеприведенным, наиболее распространенным схемам, позволяет выбрать необходимые исходные параметры биметаллической заготовки, совместимые свойства слоев и рациональную геометрию технологического инструмента для ведения устойчивого процесса прессования.

Кривые, приведенные на рис. 5, указывают на развитие динамических процессов и характер неустойчивости формирования границ слоев на выходе из очага деформации с учетом формы образующей матрицы.

Следовательно, путем моделирования и выбора оптимальных параметров биметаллической заготовки на соответствующем этапе технологического проектирования, достигаются параметры процесса прессования, что, в дальнейшем, обеспечивает существенное повышение качества биметаллических труб. Отметим, что, при этом, одновременно, обеспечивается увеличение эксплуатационной стойкости технологических инструментов (матрицы и оправки), обеспечением рациональных режимов их нагружения.

Экспериментальными исследованиями профильного пресса [2] определено, что усилия прессования биметаллических труб, диаметром 66Ч8,0 из центбежнолитой заготовки сталь 10+сталь 0Х18Н10Т, размерами 135Ч42,5Ч400, и температуре нагрева 980 – 1100 град., в диапазоне изменения параметров конических матриц, с применением стеклосмазки, достигает примерно 8 – 9 МН. Удельное давление в прцессе прессования биметаллических труб изменяется в пределах 420 – 450 МН / м².

Отметим, что полученные результаты указывают на некоторые неточности математической модели процесса прессования

биметаллических труб (ошибка расчетов в пределах 10 – 12 %). Это требует изыскания новых возможностей по совершенствованию существующих и разработке новых эффективных, технологий получения биметаллических труб широкого сортамента, и выдвигает актуальные задачи по уточнению математических моделей процессов и ставит вопросы по рациональному проектированию технологического инструмента. Очевидно, что, при этом, поскольку параметры биметаллических труб фиксированы, в первую очередь, на передний план, выдвигается задача по оптимизации параметров рабочей поверхности матричных колец. Данная задача может быть решена путем минимизации функционала осевого сопротивления процесса прессования.

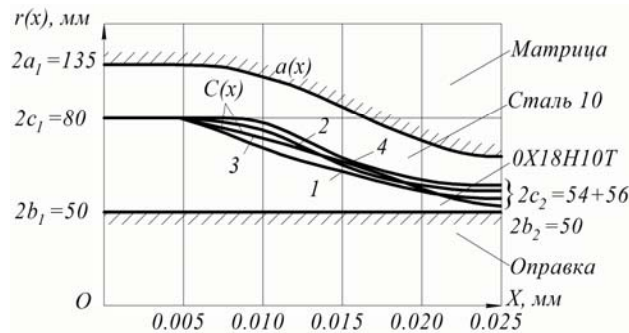


Рисунок 5 - Характер формирования границ слоев в очаге деформации при прессовании биметаллических труб на профильном прессе 31,5 МН использованием матриц с образующими (заготовка 135Ч42,5Ч400, труба 66Ч8,0, сталь 10, $\mu_1 = 3,6 \cdot 10^4 \text{ Нс} / \text{м}^2$ и 0X18H10T, $\mu_2 = 7,2 \cdot 10^4 \text{ Нс} / \text{м}^2$; $V_0=0,25 \text{ м/с}$): 1 – сфера, 2 – параболоид; 3 – конус; 4 – кубический параболоид

Выводы

1. Получено решение задачи для случая осесимметричного, двухслойного течения биметалла и металла в кольцевом зазоре очага деформации, образованного матрицей и оправкой, в рамках принятой выбранной расчетной схемы и реологии прессуемого металла

2. Установлены параметры слоев металла и биметалла, характер изменения энергосиловых и динамических параметров очага деформации при прессовании биметаллических труб.

3. Выявлено, что распределение касательных напряжений на матрице и оправке, существенно, зависит как от формы образующей рабочего участка матрицы, так и соотношения параметров слоев

металла и биметалла, и их физико-механических свойств.

4. Математическим моделированием режимов прессования бесшовных биметаллических труб, в рамках динамической модели задачи, представлено прогнозирование процессов и отработка режимов прессования биметаллических труб.

5. Произведена оценка эффективности режимов прессования биметаллических труб, и достоверности полученных результатов наиболее распространенных сочетаний слоев биметалла и металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов Ф.А. Горячая прокатка и прессование труб. /Данилов Ф.А., Глейберг А.З., Балакин В.Г.//. – М.: Metallurgy, 1972. – 576 с.
2. Чепурко М.И. Биметаллические трубы. / Чепурко М.И., Остренко В.Я., Резников Е.А. Буйновский А.М. Дидык Р.П. //– М.: Metallurgy, 1974. – 224 с.
3. Борисов С.И. Аналитический метод определения усилия при прессовании стальных труб. / Борисов С.И., Притоманов А.Е.// – В кн. Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением. М.: Metallurgizdat. 1964. С.350 – 355.
4. Гуляев Ю.Г. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. /Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А., Губинский А.В.// – Киев. Наукова думка. 1986. – 240 с.
5. Колмогоров Г.Л. Вопросы гидродинамической смазки при прессовании материалов жидкостью высокого давления. / Колмогоров Г. Л., Мельников Т. Е.// – Физика и техника высоких давлений. 1981, №3. С. 91 – 96.
6. Грудев А.П. Трения и смазки при обработке металлов давлением. / Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т.//Справочник. – М.: Metallurgy, 1982. – 312 с.
7. Kanjaidu V.V. Hydrodynamic Model of Hydrodynamic Extrusion. – Ibid. – 1966, 5, №2. P.171–174.
8. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. /Полухин П. И., Гун Г.Я., Галкин А.М.//: Справочник. – 2-е изд. – М.: Metallurgy, 1983. – 352 с.