

и ударной вязкостью при отрицательной температуре. Технология исключает образование трещин в сварных соединениях и обеспечивает высокую производительность при изготовлении полотнищ стенок резервуаров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грабин В.Ф. Металловедение сварки плавлением. – Киев: Наукова думка, 1982. – 416 с.

2. Сварочные материалы для дуговой сварки: Справочное пособие в 2 т. Т. 1. Защитные газы и сварочные флюсы / Б.П. Конищев, С.А. Курланов, Н.Н. Потапов и др. / Под общ. ред. Н.Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1989. – 544 с.
3. Подгаецкий В.В., Люборец И.И. Сварочные флюсы. – Киев: Техника, 1984. – 166 с.

© 2012 г. Н.Е. Крюков, И.Н. Ковальский, Н.А. Козырев,
В.Ф. Игушев, Р.Е. Крюков
Поступила 30 марта 2011 г.

УДК 621.774.35

С.Р. Рахманов

Национальная металлургическая академия Украины (г. Днепропетровск)

О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ПРОШИВКИ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ НА ПРОШИВНОМ СТАНЕ

Технологический процесс производства бесшовных труб на станах винтовой прокатки трубопрокатного агрегата (ТПА) предусматривает прошивку отверстий в сплошной цилиндрической заготовке с использованием различных технологических инструментов. Рабочие поверхности технологических инструментов (оправок, рабочих валков и линеек) в силу несовершенства их формы подвергаются интенсивному износу со стороны потока прошиваемого металла. Повышенный износ рабочей поверхности оправок, в частности, приводит к увеличению осевого сопротивления оправки в потоке металла и увеличению сил, действующих на стержневую систему механизма ее удержания на оси прошивки [1, 2]. Процесс прошивки трубной заготовки схематично показан на рис. 1.

Из-за ряда особенностей реализации схемы винтовой прокатки труб на станах ТПА (одного из самых сложных процессов ОМД) общеизвестные методы математического моделирования процессов прошивки не дали ожидаемых результатов. При этом из-за сложности процесса прошивки трубной заготовки существуют ограничения на применение общеизвестных методов расчета очага деформации, а также отсутствуют воз-

можности для полного представления и анализа динамики этого процесса.

В настоящей работе сделана определенная попытка по развитию уточненной математической модели динамики процесса прошивки трубной заготовки, которая адекватна действительным процессам взаимодействия металла с рабочими валками и оправкой.

Основной целью развития математических моделей технологического процесса прошивки трубной заготовки является получение картины распределения энергосиловых параметров в очаге деформации и выработка обобщающих практических рекомендаций по выбору оптимальных условий для реализации этих процессов. При этом создаются определенные предпосылки для разработки динамической модели калибровки технологического инструмента, например, оправки.

Построенная на базе гидродинамической аналогии и нетрадиционной реологии рабочей среды (металла) модель плоской задачи технологического процесса прошивки трубной заготовки (несколько в ином виде) развивает общеизвестные методы расчета, что позволяет расширить круг рассматриваемых вопросов [3, 4].

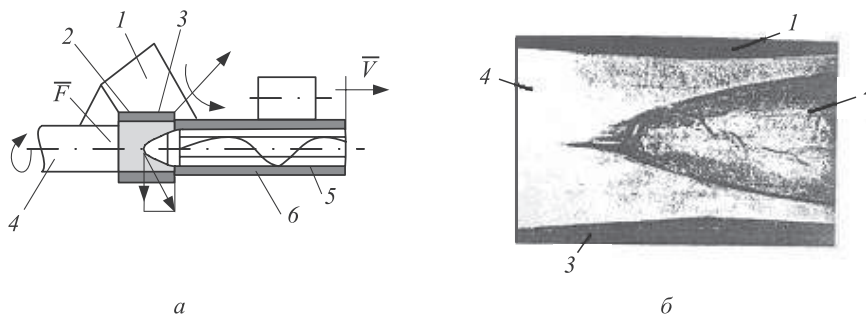


Рис. 1. Процесс прошивки трубной заготовки (а) и очаг деформации на стане винтовой прокатки труб ТПА (б):
1 – рабочий валок; 2 – оправка; 3 – линейка; 4 – заготовка; 5 – стержень оправки; 6 – гильза

Отметим, что при некоторых допущениях наиболее близкими к реальным физико-механическим свойствам предварительно нагретых трубных заготовок являются реологии линейно-вязкой и вязко-пластической рабочих сред. Необходимо отметить, что в этом случае целесообразность применения гидродинамической аналогии очага деформации к технологическим процессам прошивки трубных заготовок является вполне обоснованной.

Рассмотрим в качестве одного из приближений плоскую модель течения потока горячего металла в очаге прошивки в виде линейно-вязкой рабочей среды.

Далее покажем, что технологический процесс прошивки трубной заготовки на прошивном стане ТПА с некоторыми допущениями моделируется на основе плоской задачи гидродинамической аналогии очага деформации.

Некоторые вопросы, касающиеся возможности применения аналогичных моделей в теории ОМД, рассмотрены в работах [5, 6], в частности, изучены динамические особенности очага деформации при продольной прокатке. Использование этой модели для определения сил трения в очаге деформации при прессовании осуществлено в работе [7].

Рассмотрим течение металла как «вязкой» среды, воздействующей на технологические инструменты (оправку, валки и линейки) заданных геометрических размеров, размещенные в ограниченном пространстве очага деформации.

Отметим, что есть необходимость в том, чтобы первоначально сложный очаг прошивки рассматривать в одной плоскости как принудительное внедрение оправки в металл в направлении оси прокатки. Необходимо подчеркнуть, что это предположение вносит некоторое искажение в специфику функционирования реального очага деформации и в первом приближении несколько неточно характеризует особенности этого технологического процесса. Корректное решение такой задачи с учетом сложного движения металла, представленное в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, является весьма сложным.

Принятая расчетная схема процесса прошивки показана на рис. 2.

Движение вязкой рабочей среды, моделирующей течение потока металла в очаге деформации, считаем квазистационарным. Поэтому в гидродинамической постановке плоская задача принятой модели процесса сводится к анализу и решению системы дифференциальных уравнений Навье – Стокса [5, 7]

$$\begin{cases} F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right); \\ F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где F_x и F_z – компоненты потенциальной (массовой) силы; ρ – плотность прошиваемого металла; p – дав-

ление в рассматриваемой точке очага деформации; v_x и v_z – составляющие скорости прошивки металла в выбранной системе координат; μ – коэффициент вязкости металла.

Предполагаем, что геометрические параметры очага деформации вдоль оси прошивки изменяются плавно. В этом случае составляющей скорости v_z прошивки металла пренебрегаем ввиду ее малости по сравнению с осевыми компонентами v_x скорости. Далее будем считать, что технологический процесс прошивки происходит достаточно медленно, что позволяет пренебречь инерционными составляющими (производными $\frac{\partial v_x}{\partial t}$, $\frac{\partial v_z}{\partial t}$) в системе уравнений (1). Кроме того, в дальнейшем при решении задачи не будем учитывать компоненты массовой силы F_x и F_z .

Такая постановка упрощенной плоской задачи с принятой гидродинамической моделью для условно-стационарного очага деформации указывает на необходимость аналитического решения системы дифференциальных уравнений (1).

Решение поставленной плоской задачи процессов прошивки рассматриваем с использованием общеизвестных методов динамики с принятыми граничными условиями. Первоначально рассмотрим в общем случае аналитическое решение и проведем анализ системы дифференциальных уравнений (1) только для квазистационарных процессов течения металла в очаге деформации при выбранных граничных условиях задачи и строго вдоль оси x прошивки.

В этом случае при рассмотрении процессов течения металла в очаге деформации квазистационарными динамическую модель задачи для вязко-пластической

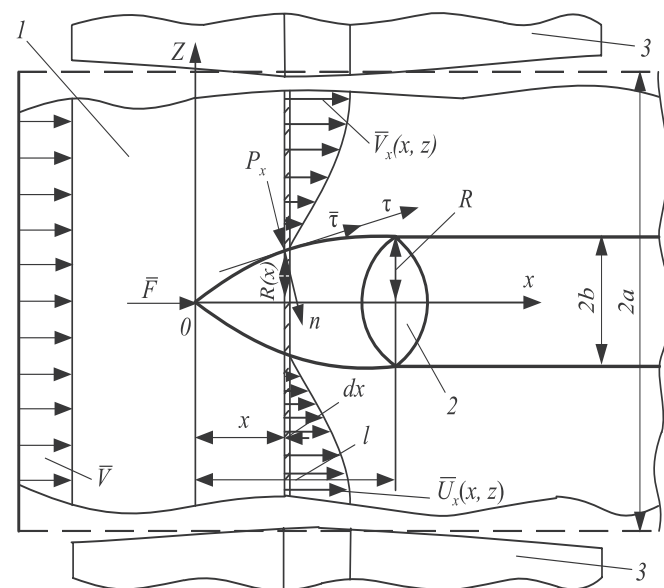


Рис. 2. Расчетная схема процесса прошивки трубной заготовки и обтекания оправки потоком металла в очаге деформации (здесь b – внутренний радиус трубы); 1 – трубная заготовка; 2 – оправка; 3 – рабочий валок

рабочей среды можно описать упрощенными уравнениями в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial p}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2}. \end{cases} \quad (2)$$

В такой постановке коэффициент вязкости рабочей среды определяется графическим дифференцированием известных механических характеристик напряженно-деформированного состояния прошиваемого металла по известной методике [7, 8].

При условии, что очаг деформации является относительно «узким» $a/l \ll 1$ (где a – усредненный диаметр калибра; l – длина очага деформации), и с учетом условия $v_z \ll v_x$, уравнение неразрывности рабочей среды можно представить в виде $\frac{\partial v_x}{\partial z} \ll \frac{\partial v_z}{\partial x}$.

Полагая, что $u_x(x, z) = v_x(x, z)$, с учетом принятых допущений из системы дифференциальных уравнений (2) имеем

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial z} = 0; \\ \frac{dp}{dx} = \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2}. \end{cases} \quad (3)$$

Решение и последующий анализ плоской модели поставленной задачи наиболее удобно представить в безразмерной форме

$$\bar{u}_x(\bar{x}, \bar{z}) = \frac{u_x(x, z)}{v}; \quad \bar{x} = \frac{x}{a}; \quad \bar{z} = \frac{z}{a}; \quad \bar{p} = \frac{pa}{\mu v},$$

а систему уравнений (3) в виде

$$\frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} = \frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial \bar{z}^2}, \quad (4)$$

где v – осевая составляющая скорости движения металла в очаге деформации перед носком оправки ($v = \text{const}$).

Интегрируя дифференциальное уравнение (4), получим

$$\bar{u}_x(\bar{x}, \bar{z}) = \frac{1}{2} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \bar{z}^2 + c_1(\bar{x}) \bar{z} + c_2(\bar{x}), \quad (5)$$

где $c_1(\bar{x})$, $c_2(\bar{x})$ – некоторые функции, определяемые из реальных граничных условий очага деформации при прошивке трубной заготовки.

С учетом условия взаимодействия прошиваемого металла с рабочими валками и оправкой в очаге деформации $u_x(z = R(x)) = 0$ и $u_x(z = a) = v$ или в безразмерной форме (с учетом $\bar{R}(\bar{x}) = R(x)/a$) $\bar{u}_x(\bar{z} = \bar{R}(\bar{x})) = 0$ и $\bar{u}_x(\bar{z} = 1) = 1$ из уравнения (5) находим

$$\begin{cases} 0 = \frac{1}{2} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \bar{R}^2(\bar{x}) + c_1(\bar{x}) \bar{R}(\bar{x}) + c_2(\bar{x}); \\ 1 = \frac{1}{2} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} + c_1(\bar{x}) + c_2(\bar{x}). \end{cases} \quad (6)$$

Из системы уравнений (6) определяем соответствующие функции $c_1(\bar{x})$ и $c_2(\bar{x})$ в виде

$$c_1(\bar{x}) = \frac{1}{2} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} [\bar{R}(\bar{x}) + 1]; \quad (7)$$

$$c_2(\bar{x}) = -\frac{1}{2} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \bar{R}(\bar{x}) \left[\bar{R}(\bar{x}) + \frac{1}{2} \right]. \quad (8)$$

Исходя из условия постоянства секундных объемов металла перед носком оправки и интегрального уравнения непрерывности потока при течении металла между инструментами в очаге деформации, можно записать

$$\int_{R(x)}^a 2\pi z u_x dz = \pi a^2 v.$$

В безразмерной форме это выражение имеет вид

$$2 \int_{\bar{R}(\bar{x})}^1 \bar{u}_x \bar{z} d\bar{z} = 1. \quad (9)$$

Из уравнения (9) с учетом текущей скорости движения потока металла в очаге деформации u_x находим

$$2 \int_{\bar{R}(\bar{x})}^1 \left[\frac{1}{2} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \bar{z}^2 + c_1(\bar{x}) \bar{z} + c_2(\bar{x}) \right] \bar{z} d\bar{z} = 1. \quad (10)$$

После интегрирования уравнения (10) получаем зависимость

$$\begin{aligned} \frac{1}{4} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} [1 - \bar{R}^4(\bar{x})] + \frac{2}{3} c_1(\bar{x}) [1 - \bar{R}^3(\bar{x})] + \\ + c_2(\bar{x}) [1 - \bar{R}^2(\bar{x})] = 1. \end{aligned} \quad (11)$$

Для установления градиента давления металла в очаге деформации воспользуемся уравнением (11). Учитывая постоянные интегрирования $c_1(\bar{x})$ и $c_2(\bar{x})$, из выражений (7) и (8) имеем

$$\begin{aligned} \frac{1}{4} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} [1 - \bar{R}^4(\bar{x})] + \frac{1}{3} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} [\bar{R}(\bar{x}) + 1] [1 - \bar{R}^3(\bar{x})] - \\ - \frac{1}{2} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \bar{R}(\bar{x}) \left[\bar{R}(\bar{x}) + \frac{1}{2} \right] [1 - \bar{R}^2(\bar{x})] = 1 \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \left(\frac{1 - \bar{R}^4(\bar{x})}{4} + \frac{1}{3} [\bar{R}(\bar{x}) + 1] [1 - \bar{R}^3(\bar{x})] - \right. \\ \left. - \bar{R}(\bar{x}) \left[\bar{R}(\bar{x}) + \frac{1}{2} \right] [1 - \bar{R}^2(\bar{x})] \right) = 1. \end{aligned} \quad (12)$$

Тогда из выражения (12) функцию распределения в дифференциальной форме (градиент) давления в очаге деформации можно записать в виде

$$\frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} = \frac{1}{f(\bar{x})}, \quad (13)$$

где

$$f(\bar{x}) = \frac{1 - \bar{R}^4(\bar{x})}{4} + \frac{1}{3} [\bar{R}(\bar{x}) + 1] [1 - \bar{R}^3(\bar{x})] - \\ - \bar{R}(\bar{x}) \left[\bar{R}(\bar{x}) + \frac{1}{2} \right] [1 - \bar{R}^2(\bar{x})]$$

– параметр геометрии стесненного инструментами (линейками, валками и оправкой) очага деформации.

Интегрируя дифференциальное уравнение (13), получаем выражение для определения давления на рабочие участки технологического инструмента (оправки) в рассматриваемом сечении очага деформации

$$\bar{p}(x) = - \int_{\bar{x}}^{\bar{l}} \frac{d\bar{x}}{f(\bar{x})}. \quad (14)$$

Анализ технологического процесса прошивки и квазистационарного течения металла в очаге деформации требует учета значимых сил трения, действующих со стороны обтекающего потока металла на рабочие участки технологических инструментов (оправки). Используя закон вязкого трения Ньютона, касательные напряжения в очаге деформации представим в виде

$$\tau(x, z) = \mu \frac{\partial u_x}{\partial z} \text{ или } \bar{\tau}(\bar{x}, \bar{z}) = \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial \bar{z}}, \quad (15)$$

где $\bar{\tau} = \frac{\tau a}{\mu v}$ – касательное напряжение в безразмерной форме.

После соответствующих подстановок текущих значений скорости течения потока металла (5) в уравнение (15) для рассматриваемого сечения очага деформации имеем

$$\bar{\tau}(\bar{x}, \bar{z}) = \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} \bar{z} + c_1(\bar{x}). \quad (16)$$

Тогда с учетом $c_1(\bar{x})$ из выражения (16) на участке контакта оправки с потоком прошиваемого металла при $\bar{z} = \bar{R}(\bar{x})$ находим

$$\bar{\tau}(\bar{x}) = \frac{1}{f(\bar{x})} [1,5\bar{R}(\bar{x}) + 0,5]. \quad (17)$$

При равновесии очага деформации аналитическое выражение для определения осевого сопротивления оправки в потоке прошиваемого металла (усилия прошивки) имеет вид

$$F = \int_0^l 2\pi R(x) R'(x) p dx + \int_0^l 2\pi R(x) \tau dx.$$

Произведя соответствующие подстановки в это уравнение выражений (14) и (17), определяем функцию осевого сопротивления в безразмерной форме

$$\bar{F} = \frac{F}{2\pi\mu v a} = - \int_0^{\bar{l}} \bar{R}(\bar{x}) \bar{R}'(\bar{x}) \left[\int_{\bar{x}}^{\bar{l}} \frac{d\bar{x}}{f(\bar{x})} \right] d\bar{x} + \\ + \int_0^{\bar{l}} \frac{1}{f(\bar{x})} [1,5\bar{R}(\bar{x}) + 0,5] \bar{R}(\bar{x}) d\bar{x}. \quad (18)$$

Преобразуя первое слагаемое выражения (18) к виду

$$- \int_0^{\bar{l}} \bar{R}(\bar{x}) \bar{R}'(\bar{x}) \left[\int_{\bar{x}}^{\bar{l}} \frac{d\bar{x}}{f(\bar{x})} \right] d\bar{x} = - \frac{1}{2} \bar{R}^2(\bar{x}) \int_{\bar{x}}^{\bar{l}} \frac{d\bar{x}}{f(\bar{x})},$$

окончательно можно записать

$$\bar{F} = - \frac{1}{2} \bar{R}^2(\bar{x}) \int_{\bar{x}}^{\bar{l}} \frac{d\bar{x}}{f(\bar{x})} + \int_0^{\bar{l}} \frac{\bar{R}(\bar{x})}{f(\bar{x})} [1,5\bar{R}(\bar{x}) + 0,5] d\bar{x}. \quad (19)$$

Результаты расчета энергосиловых параметров прошивного стана ТПА 140 представлены на рис. 3.

Расчеты процесса прошивки трубной заготовки диам. 130 мм из стали 20 на оправке диам. 77 мм показывают, что при принятой реологии и постановке задачи динамической аналогии форма образующей оправки, соответствующая кубической параболе, при прочих равных условиях обеспечивает минимальное осевое сопротивление потоку прошиваемого металла, рациональное распределение давления металла и касательных напряжений в очаге деформации.

Удовлетворительное совпадение показывают полученные результаты и данные многочисленных экспериментальных исследований, приведенные в работах [1–3]. Например, расчетная величина осевого сопротивления оправки (усилия прошивки) при прошивке трубной заготовки диам. 130 мм из стали 20 на оправке диам. 77 мм на прошивном стане ТПА 140 составляет 135 кН, что несколько отличается от результатов экспериментальных исследований (180 кН).

Необходимо отметить, что через определенное время эксплуатации оправки образующая ее рабочей поверхности приобретает ту реальную («естественную») форму, которая по картине износа идентифицируется с некоторой кривой, приближенно совпадающей с формой кубической параболы. По всей видимости, оправка «приспосабливается» к условиям обтекания горячим потоком металла в процессе прошивки.

Полученные результаты по определению энергосиловых параметров очага деформации на основе гидродинамической аналогии и осевого сопротивления оправки в динамической постановке несколько расши-

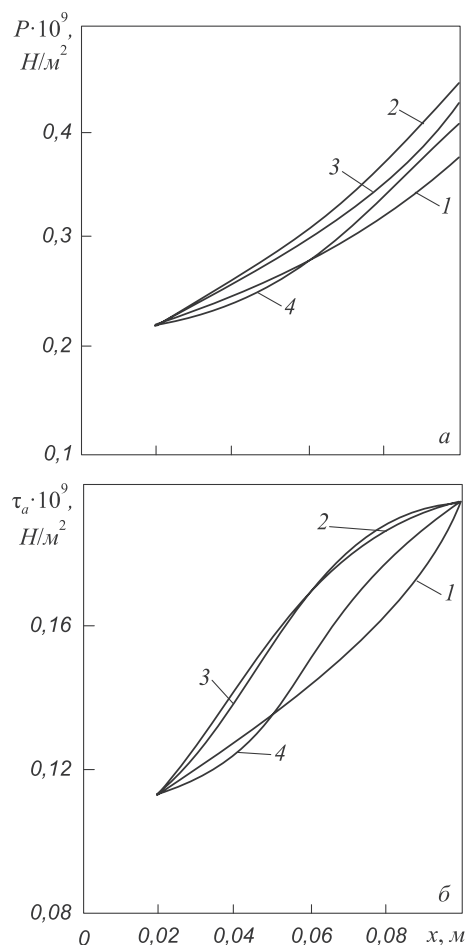


Рис. 3. Распределение давлений P металла в очаге деформации (а) и распределение касательных напряжений τ_a на поверхности оправки в очаге деформации (б) в процессе прошивки трубной заготовки диам. 130 мм из стали 20 на оправке диам. 77 мм при различной форме образующей оправки:

1 – конус; 2 – параболоид; 3 – тор; 4 – кубический параболоид

входят в неявной форме, возникает необходимость доказательства правомерности построения модифицированной вариационной задачи Эйлера–Лагранжа на множестве нормированного пространства очага деформации для принятой модели процесса прошивки трубной заготовки.

Достоверность полученных результатов для принятой динамической модели процесса прошивки установлена в сочетании с другими наиболее распространенными моделями очага деформации, которые широко представлены в литературе [1 – 3].

Выводы. Дальнейшее развитие получила динамическая модель очага деформации прошивного стана. Путем решения плоской задачи гидродинамической аналогии очага деформации осуществлен анализ и синтез технологического процесса прошивки трубной заготовки на прошивном стане. На базе гидродинамической аналогии технологического процесса получены уточненные значения энергосиловых параметров очага деформации, которые формируют и анализируют динамические условия прошивки трубной заготовки. Сформирован уточненный функционал осевого сопротивления оправки потоку прошиваемого металла. Это создает определенные предпосылки для построения вариационной задачи по минимизации осевого сопротивления оправки, выработки рекомендаций по калибровке инструмента (оправки) и выбору условий реализации оптимальных режимов технологического процесса прошивки трубной заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Потапов И.Н., Полухин П.И. Новая технология винтовой прокатки. – М.: Металлургия, 1975. – 344 с.
2. Оклея Л.Н. Качество горячекатаных труб. – М.: Металлургия, 1986. – 144 с.
3. Технология трубного производства. Учебник для вузов. / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М.: Интермет-Инжиниринг, 2002. – 640 с.
4. Колмогоров Г.Л., Мельников Т.Е. // Физика и техника высоких давлений. 1981. № 3. С. 91 – 96.
5. Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А., Губинский А.В. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. – Киев.: Наукова думка, 1986. – 240 с.
6. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
7. Kanjaidu V.B. A hydrodynamic model of hydrodynamic extrusion. – Ibid. 1966. № 2. Р. 171 – 174.
8. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. 2-е изд. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

© 2012 г. С.Р. Рахманов
Поступила 22 февраля 2011 г.