



УДК 621.771

Т.В. Бровман
ФГБОУ ВО «Тверской государственный
технический университет
г. Тверь, Российская Федерация
E-mail: brovman@mail.ru
Дата поступления 05.11.2019

РАСЧЕТ УСИЛИЙ ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ТРУБ

Аннотация

Получены формулы для расчета напряженно-деформированного состояния трубной заготовки при формировании утолщенных концевых участков. Рассчитаны деформации, напряжения и силы, действующие на трубные заготовки при различных температурах их нагрева, это позволяет изыскать резервы и повысить эффективность работы действующих агрегатов.

Ключевые слова: концы труб; давление пуансона; температура; степень деформации; усилие деформации.

Введение

Потребность в трубах с утолщенными концами значительна. Насосно-компрессорные, бурильные трубы изготавливают в соответствии с ГОСТ 633-80 и API 5 CT. Несоответствие размеров и качества поверхности [1-3] утолщенных концов трубы стандартным требованиям может быть вызвано переохлаждением из-за малой толщины стенок. Если их температура снижается менее 1050°C , то количество некачественных деталей достигает 5-7% [4 - 6, 8].

Технологические отходы при прессовании составляют от 10 до 15 % и более от массы заготовки [9-11].

Исследования по выбору оптимальных параметров прессования на гидравлических прессах и анализ этих факторов, а также выбор критериев оптимальности составляет основу дальнейшего повышения эффективности процесса.

Основная часть

Различия в процессах пластической деформации при обработке давлением состоят в том, что в некоторых из них пластическую деформацию осуществляют по всему объему заготовки, а в ряде процессов пластическую деформацию реализуют только в части объема заготовки.

При ковке и штамповке пластическая деформация происходит по всему объему деформируемого тела. При прокатке пластическая деформация также реализуется по всему объему заготовки не одновременно, а последовательно по длине проката. К процессам обработки давлением в которых пластическая деформация реализуется только в части объема деформируемого тела относится деформация концевых участков труб, когда необходимо получать трубы переменной толщины с утолщениями вблизи концов труб. Если деформацией сжатия на трубе длинами 2...4 м формируют участок увеличенной толщины длиной 0,1...0,2м, то зона пластической деформации составляет 0,025...0,1 общей длины заготовки, т.е. является локальной деформацией [12-13].

При локальной деформации концевых участков длинных труб возможна потеря устойчивости и нарушение формы заготовки, ее искривление. Нестабильности процессов пластической деформации способствуют неизбежные изменения условий их реализации: неравномерность нагрева заготовок и колебания коэффициента трения, разброс предела текучести в пределах $\pm(0,10...0,15)\sigma_{\text{т}}$.

На схеме локальной деформации трубы с начальным диаметром d_0 , рисунок 1а, после деформации она имеет

концевой участок толщиной выше, чем остальной трубы.

Диаметр d_0 увеличен на длине l до d_1 за счет увеличения наружного диаметра, либо за счет уменьшения внутреннего диаметра.

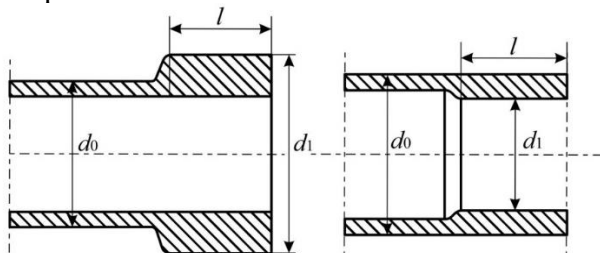


Рисунок 1. Схемы наружного и внутреннего утолщений концов трубы

При давлении пуансона на торцовую поверхность трубы усилие равно [1-4]:

$$P = pF_k, (1)$$

$$\text{где } p = n_\sigma \sigma_s, F_k = 0,25 \pi (d_0^2 - d^2)$$

p - среднее давление на контактной поверхности,

n_σ - коэффициент напряженного состояния,

F_k - площадь контактной поверхности,

d_0, d - наружный и внутренний диаметры заготовки,

σ_s - предел текучести (сопротивление деформации).

Поскольку наружный диаметр d_0 в данном процессе остается постоянным (имеет место течение «внутри трубы»), то принимаем конечную величину внутреннего диаметра d_1 . Если начальная толщина трубы была равна s_0 , а конечная s , то $d_1 = d_0 - 2s$,

$$F_k = 0,25 \pi [d_0^2 - (d_0 - 2s)^2] = \frac{\pi}{4} (4d_0 s - 4s^2) = \pi s (d_0 - s) (2).$$

Предел текучести определяем по эмпирической формуле:

$$\sigma_s = \sigma_0 \varepsilon^{n_1} \dot{\varepsilon}^{n_2} \exp(-n_3 t), (3)$$

где σ_0, n_1, n_2, n_3 постоянные, которые принимаем для стали 0X18H10T равными:

$$\sigma_0 = 3400 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{-n_2};$$

$$n_1 = 0,28; n_2 = 0,09; n_3 = 2,8 \cdot 10^{-3}$$

Степень деформации ε определена, как натуральный логарифм отношения площадей сечения трубы после и до деформации:

$$\varepsilon = \ln \frac{F_1}{F_0} = \ln \left(\frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2 - d_{10}^2} \right),$$

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{4d_0 s - 4s^2}{4d_0 s_0 - 4s_0^2} \right) = \ln \left[\left(\frac{s}{s_0} \right) \left(\frac{1 - \frac{s}{d_0}}{1 - \frac{s_0}{d_0}} \right) \right]. (4)$$

Примем время высадки конца трубы [1,2] $\tau = 4\text{с}$, тогда средняя скорость деформации равна $\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\tau}$, а температуру примем равной $t = 1100^\circ\text{C}$

При этом из формулы (3) получаем

$$\sigma_s = \sigma_0 \varepsilon^{n_1 + n_2} \tau^{-n_2} \exp(-n_3 t) (5),$$

$$\exp(-n_3 t) = \exp(-2,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1100)$$

$$= \exp(-3,08)$$

$$= 4,35 \cdot 10^{-2};$$

$$\sigma_0 \tau^{-n_2} = 3400 \cdot 4^{-0,09} = 3000; \sigma_s$$

$$\approx 140 \varepsilon^{0,37}$$

Примем максимальное значение n_σ равное 2,5.

Пусть, например, $d_0 = 108\text{мм}$, $s_0 = 4,5 + 3,5 = 8\text{мм}$.

По формуле (2)

$$F_k = 3,14 \cdot 8 \cdot (108 - 8) = 2510 \text{ мм}^2 = 0,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2,$$

$$\varepsilon = \ln \left[\left(\frac{8}{4,5} \right) \left(\frac{1 - \frac{8}{108}}{1 - \frac{4,5}{108}} \right) \right] = \ln 1,72 = 0,54$$

$$\sigma_s = 140 (0,54)^{0,37} = 110 \text{ МПа},$$

$$p = 2,5 \cdot 110 = 275 \text{ МПа},$$

$$P = 275 \cdot 0,25 \cdot 10^{-2} = 0,69 \text{ МН}.$$

При максимальной толщине трубы данного диаметра:

$$d_0 = 108 \text{ мм}, s_0 = 22 \text{ мм},$$

$$s = 22 + 3,5 = 25,5 \text{ мм};$$

$$F_k = 3,14 \cdot 25,5 (108 - 25,5) = 6600 \text{ мм}^2 = 0,6610^{-2} \text{ м}^2;$$

$$\varepsilon = \ln \left[\left(\frac{25,5}{22} \right) \left(\frac{1 - \frac{25,5}{108}}{1 - \frac{22}{108}} \right) \right] = \ln 1,11 =$$

$$= 0,106 \approx 0,11;$$

$$\sigma_s = 140 (0,11)^{0,37} = 62 \text{ МПа},$$

$$P = 62 \cdot 2,5 = 160 \text{ МПа},$$

$$P = 160 \cdot 0,66 \cdot 10^{-2} = 1,1 \text{ МН}.$$

В данном расчете вычисления для каждого диаметра трубы были выполнены для минимальной и максимальной толщины труб. Кроме того, все расчеты выполнены применительно к величине сопротивления деформации стали 0X18H10T, считая, что соответствующие величины для сталей 12X1M1Ф и 15X1M1Ф значительно ниже. Для заготовок из сталей 20 и 15ГС сопротивление деформации будет значительно ниже (на 30-40%), чем для стали

ОХ18Н10Т, однако, в данном расчете приведена оценка только максимальных величин усилий.

Таблица 1
Сортамент труб из сталей 20, 15ГС, 12Х1М1Ф, 15Х1М1Ф для которых проведены расчеты и выполнены тензометрические измерения формообразования утолщений на концах

Диаметр трубы, мм	Толщина стенки, мм
108	4,5...22
133	5...16
159	7...30
194	15...36
219	9...25
245	45
273	10...45
325	13...60
377	13...60
426	14...50
465	16...19

Таблица 2
Сортамент труб из стали ОХ18Н10Т, для которых проведены расчеты и выполнены тензометрические измерения формообразования утолщений на концах

Диаметр трубы, мм	Толщина стенки, мм
108	5...12
133	6...14
159	6...17
219	11...12
220	8
245	19...25
273	11...20
325	12...16

Величина хода пуансона l_0 должна обеспечить утолщение трубы (и уменьшение внутреннего диаметра) на величину, равную 3,5 мм на сторону на длине $l = 200$ мм.

Отсюда из условия постоянства объема

$$l_0 \frac{\pi}{4} [d_0^2 - (d - 2s_0)^2] = \frac{\pi}{4} l [(d_0 - 2s_0)^2 - (d_0 - 2s)^2],$$

От куда получаем:

$$l_0 = l \frac{d_0(s-s_0) + s_0^2 - s^2}{s_0(d_0 - s_0)}, \quad l_0 = l \frac{\Delta s(d_0 - s_0 - s)}{s_0(d_0 - s_0)}.$$

Например, если $d_0 = 108$ мм, $s_0 = 4,5$ мм, $s = 8$ мм, $l = 200$ мм, то

$$l_0 = 200 \frac{3,5 (108 - 12,5)}{4,5 (108 - 4,5)} = 143 \text{ мм}.$$

Результаты расчетов приведены в таблице 3. Здесь указаны диаметры и конечные величины толщины стенки, а также предел текучести и среднее давление при $t = 1100^\circ\text{C}$. Этой температуре соответствует усилие P_1 , температуре 1000°C усилие P_2 . Усилие P_3 определено для температуры заготовок 900°C . Такое понижение температуры возможно в реальных условиях при задержке процесса и подстуживании нагретого конца заготовки.

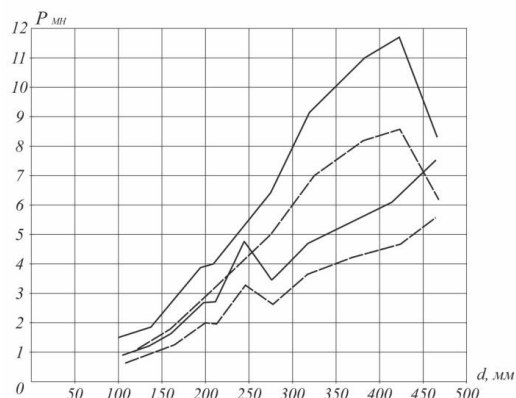


Рисунок 2. Зависимость усилия высадки труб от их диаметра при $t = 1000^\circ \div 1100^\circ\text{C}$

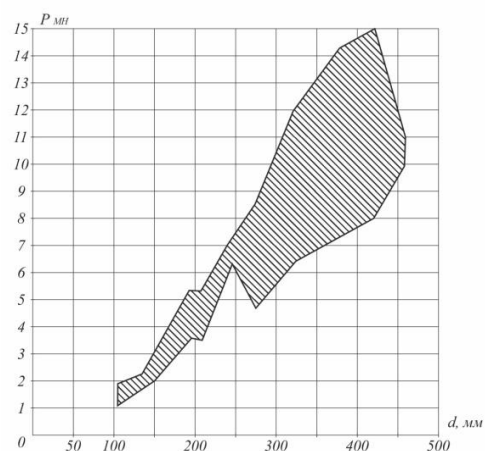


Рисунок 3. Зависимость усилия высадки от диаметра при $t = 900^\circ\text{C}$

На рисунке 2 приведены графики усилий в функции от диаметра трубы для наименьшей и наибольшей толщины труб. Графики соответствуют температуре 1000°C (сплошные линии) и 1100°C (пунктир). На рисунке 3 приведен график усилий при 900°C для сортамента труб в диапазоне размеров от 108 до 465 мм, для высадки которых потребовалось бы усилие машины $P = 12 \text{ МН} \dots 15 \text{ МН}$. Ковочная машина, рас-

считанная на усилие $P=6,5\text{МН}$ (650т) обеспечивает возможность изготовления труб с утолщенными концами диаметром до 245мм (включительно)[14-15].Ход цилиндра следует предусмотреть равным (с запасом) 180мм.Усилие сжатия полуматриц для

обеспечения безоблойной деформации должно примерно в два раза, превышать усилие высадки, т.е. для ковочной машины усилием 6,5МН составлять 13 МН. Приблизительная масса машины составит 110т.

Таблица 3

Энергосиловые параметры при высадке концов труб

d_0	s	σ_s	p	F_k	P_1	P_2	P_3
108	7,5	110	275	$0,25 \cdot 10^{-2}$	0,69	0,92	1,22
108	25,5	62	160	$0,66 \cdot 10^{-2}$	1,10	1,48	2,0
133	8,5	108	270	$0,334 \cdot 10^{-2}$	0,90	1,2	1,6
133	19,5	73	182	$0,72 \cdot 10^{-2}$	1,31	1,74	2,3
159	10,5	102	255	$0,49 \cdot 10^{-2}$	1,27	1,69	2,25
159	33,5	60	150	$1,32 \cdot 10^{-2}$	1,97	2,63	3,5
194	18,5	79	198	$1,03 \cdot 10^{-2}$	2,05	2,73	3,6
194	39,5	63	154	$1,92 \cdot 10^{-2}$	2,97	3,96	5,3
219	12,5	97	245	$0,81 \cdot 10^{-2}$	1,97	2,63	3,5
219	28,5	70	175	$1,7 \cdot 10^{-2}$	3,0	4,0	5,3
245	22,5	88	222	$1,6 \cdot 10^{-2}$	3,6	4,8	6,4
245	48,5	54	135	$3 \cdot 10^{-2}$	4,05	5,4	7,2
273	13,5	93	232	$1,1 \cdot 10^{-2}$	2,6	3,45	4,6
273	48,5	57	62	$3,4 \cdot 10^{-2}$	4,85	6,45	8,6
325	16,5	89	225	$1,6 \cdot 10^{-2}$	3,56	4,75	6,3
325	63,5	52	130	$5,2 \cdot 10^{-2}$	6,75	9,0	12
377	16,5	89	225	$1,86 \cdot 10^{-2}$	4,1	5,45	7,3
377	63,5	52	130	$6,1 \cdot 10^{-2}$	8,1	10,8	14,4
426	1,5	83	205	$2,75 \cdot 10^{-2}$	4,6	6,1	8,1
426	53,5	54	135	$6,3 \cdot 10^{-2}$	8,5	11,3	15
465	19,5	81	205	$2,74 \cdot 10^{-2}$	5,65	7,5	10,0
465	22,5	81	205	$3 \cdot 10^{-2}$	6,15	8,2	10,9

Заключение

Результаты исследования позволяют заключить следующее:

1. Процессы обработки металлов давлением часто ограничены данными теоретических оценок, особенно в области нестационарных переходов, в которых используют деформацию не по всему объему деформируемого тела, а только в малой части его объема. В данной работе приведены расчеты процессов локальной деформации при формировании утолщенных концов трубных заготовок.
2. Определены усилия для реализации локальной пластической деформации осадки, позволяющие определить диапазоны технологических режимов и проведены экспериментальные исследования усилий при деформации полых заготовок. Получены данные для проектирования надежных ковочных машин.

Библиографический список

1. Шаталов Р.Л., Мочалов Н.А., Босхамджиев Н.Ш., Кручер Г.Н. Новые технологии обработки давлением медных и цинковых сплавов. М.: Теплотехник.2006 -219с.
2. Шинкин В.Н., Коликов А.П. Моделирование процесса формовки заготовки для труб большого диаметра // Сталь.2011. №11. С.54-58.
3. Коликов А.П. Звонарев Д.Ю. Моделирование процесса экспандирования сварных труб большого диаметра // Сталь. 2017. №3. С. 41-43.
4. Бровман М.Я. Исследования напряженного состояния цилиндрических труб с переменными механическими свойствами//Вестник машиностроения, 2011. №8. С. 15-19.
5. Бровман М.Я. Усовершенствование технологии изготовления сварных трубопроводов//Машиностроитель. 2017. №6. С. 24-30.

6. Бровман Т.В., Кутузов А.А. Повышение точности при изготовлении криволинейных металлических заготовок деформацией изгиба // *Металлы*, 2016. №5. С.34-38.
7. Шинкин В.Н., Барыков А.М., Коликов А.П., Мокроусов В.И. Критерий разрушения труб большого диаметра при несплавлении сварного соединения и внутреннем давлении // *Производство проката*. 2012. №2. С.14-16.
8. Шинкин В.Н. *Механика сплошных сред*. М.: Изд. Дом МИСиС. 2010.-235с.
9. Шинкин В.Н. *Сопротивление материалов для металлургов*. М.: Изд. Дом МИСиС. 2013. -655с.
10. Шофман Л.А. *Теория и расчеты процессов холодной штамповки*. -М.: Машиностроение, 1964. -375с.
11. Ерпатов М.В., Богатов А.А., Кунина А.С. Исследование и совершенствование технологии производства насосо-компрессорных труб с высаженными концами. // *Инновации в материаловедении и металлургии: материалы III Междунар. интератив. Науч. -практ. конф.*, [Екатеринбург, 17-21 декабря 2013 г.] - Екатеринбург: Изд-во Урал.ун-та, 2013. С. 90-97
12. Оценка статистическими методами точности и стабильности технологического процесса производства электросварных прямошовных труб. Шелест А.Е., Юсупов В.С., Поклонов Г.Г., Дозорцев Ю.К. // *Металлы*. 2004. №6. С.65-73
13. Совершенствование технологии производства сварных прямошовных труб (Сообщение 1) Юсупов В.С., Колобов А.В., Акопян К.Э., Селезнев М.С., Со-мин М.А. // *Сталь*. 2015. №8. С.44-50.
14. Процессы Интенсивной деформации Юсупов В.С., Алымов М.И., Миляев И.М., Колобов А.В., Андреев В.А., Просвирин В.В. В сборнике: *Научно-технический прогресс в черной металлургии. Материалы II. Международной научно-технической конференции*. Ответственный редактор А.Л.Кузьминов. 2015. С.24-26.
15. Forming of Curvilinear metal billets Brovman T.V., Yusupov V.S.B сборнике: *Journal of Physics: Conference Series 7. Сер. «VII International Conference: Functional Nanomaterials and High Purity Substances»* 2018. С.012008

Information about the paper in English

T.V. Brovman

Tver State Technical University

Tver, the Russian Federation

E-mail: brovman@mail.ru

Received 05.11.2019

CALCULATION OF FORCES AT LOCAL DEFORMATION OF PIPES

Abstract

The author devised the formulas for calculating the stress and strain state of pipes, when forming thick end parts. The calculated deformation, stress and forces acting on pipes at different heating temperatures are used to find spare resources and increase performance of operating machines.

Keywords: pipe ends, punch pressure, temperature, deformation rate, deformation force.
