

УДК 621.73

Ткачев Р.О.<sup>1</sup>, Каргин Б.С.<sup>2</sup>, Кирицев А.Д.<sup>3</sup>

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ИНТЕРВАЛА ДЛЯ ОБЖИМА КОНЦОВ ТРУБ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОМ НАГРЕВЕ**

*На основании анализа зависимости предела текучести от температуры и с учётом дифференцированного нагрева при обжиме концов труб из стали и сплава Д16, установлен температурный интервал деформирования.*

Изделия из труб в последние годы находят все более широкое применение как силовые элементы машин и сооружений так и как корпусные элементы отдельных изделий. Обжим конца трубчатой заготовки является одной из операций штамповки труб и она нашла отражение в достаточно большом числе научных исследований, однако ряд важных вопросов, связанных с выполнением этой операции требует тщательного исследования и создание на его основе нового или усовершенствование существующего производства [1].

Основным недостатком применяемых в настоящее время процессов обжима является опасность потери устойчивости деформируемой заготовки в осевом направлении или образование гофр (складок) в радиальном направлении, что наблюдается чаще всего для тонкостенных труб [1]. Эти и другие виды дефектов ограничивают степень деформации в каждом переходе. Поэтому при коэффициенте обжима больше  $1,5 \div 1,8$  заданная деформация, как правило, обеспечивается за несколько переходов, что значительно удорожает стоимость изделия. Под коэффициентом обжима здесь понимается отношение наружного диаметра заготовки (трубы) к наименьшему наружному диаметру после перехода. При коэффициенте обжима больше  $3 \div 4$ , особенно в случае образования горловины, число переходов доходит до  $4 \div 5$  и при этом их иногда дополняет ряд вспомогательных промежуточных операций, таких как нанесение смазки, снятие нагартовки путем отжига.

Усилие деформирования, возрастающее с увеличением очага деформируемого металла приводит к потере устойчивости. Во избежание этого необходимо уменьшить сопротивление деформации. Этого можно добиться, если создать условия при которых будет значительно уменьшен предел текучести в деформируемой зоне пропорционально степени деформации. Разработанные с этой целью способы обжима концов труб с одновременным нагревом деформируемого металла в очаге деформации теплом штампа или электрическим контактным нагревом оказались мало производительными и ограниченными физическими свойствами деформируемых материалов.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование и совершенствование процесса обжима с дифференцированным нагревом, который носил бы универсальный характер, а именно, не ограничивать или, во всяком случае, значительно расширить диапазон используемых материалов труб, а также не ограничивать коэффициент обжима какими-то условиями, кроме условий несмыкаемости стенок обжатой с образованием горловины трубы. Этот процесс позволяет обжимать концы труб из различных деформируемых металлов и их сплавов за один переход и обеспечить при высоком качестве значительное снижение себестоимости продукции и, следовательно, ее конкурентоспособность.

Разработанный на кафедре КШП и исследуемый нами принцип обжима с дифференцированным индукционным нагревом базируется на правильно выбранном температурном интервале деформирования. Это значит, что процесс обжима за один переход выполняется без какой-либо потери устойчивости. Поэтому правильный выбор температур при обжиме с дифференци-

---

<sup>1</sup>ПГТУ, ст. препод.

<sup>2</sup>ПГТУ, канд. техн. наук, проф.

<sup>3</sup>ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

рованным нагревом определяет качество изделия и себестоимость операции, что в условиях промышленного производства является очень важным.

Наиболее высокая температура при обжиге с дифференцированным нагревом должна быть в области наибольших деформаций. В то же время она должна быть по возможности, более низкой, но при которой произойдет деформация в соответствующем сечении трубы. Причины этого положения следующие:

- чем ниже температура, тем меньше коэффициент трения [2, 3];
- чем ниже температура, тем меньше рост зерна при нагреве, что для некоторых марок сталей позволяет в дальнейшем отказаться от термообработки полученных изделий [3];
- чем ниже температура обжимаемой трубы, тем стойкость штампов выше [4, 5];
- чем ниже температура нагрева, тем меньше расход электроэнергии, что в современных условиях особенно актуально;
- снижение температуры ведет к уменьшению окалинообразования [6], что повышает качество изделия.

Есть и положительные факторы в увеличении температуры, например – снижение усилия деформации. Однако, причин для снижения наибольшей температуры при дифференцированном нагреве больше при условии сохранения устойчивости заготовки. Как показала практика проведенных нами экспериментов и промышленное массовое производство баллонов высокого давления [4], верхний уровень допустимых температур при обжиге с максимально возможным коэффициентом обжима должен быть для стали 900 – 1000 °С. На основе нашего опыта и опыта других исследователей [4 – 9] для стальных труб нижняя температура при обжиге должна быть 550 – 600 °С, а для труб из сплава Д16 – 150 – 200 °С.

Рассмотрим, как определить в зависимости от заданного коэффициента обжима температуру в очаге деформаций сначала для стальных труб, а затем для труб из сплавов алюминия.

Изменение температуры в очаге деформации принимается равномерным по длине образующей матрицы. Принято, что изменение предела текучести происходит в соответствии с изменением температуры и определяется для сталей по зависимости [10]

$$\sigma_s = \sigma_0 \cdot e^{-\alpha T}, \quad (1)$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести при температуре  $T$ ;

$\sigma_0$  – предел текучести при нормальной температуре  $T_n$ ;

$\alpha$  – температурный коэффициент.

Эта зависимость, найденная экспериментально В.П. Шишкиным [9] подтвержденная рядом ученых [10, 11] используется в настоящее время в теоретических и экспериментальных работах. В расчетах коэффициент  $\alpha$  необходимо определять для каждого температурного интервала фазовых превращений:  $\alpha = \frac{\ln \sigma_0 - \ln \sigma_s}{T}$ , где  $T = T_k - T_n$ ;  $T_k$  – конечная температура для которой определяется  $\alpha$ .

В соответствии с результатами испытаний стали ст. 4 вычисленное значение коэффициента  $\alpha$  определяется из таблицы 1.

Таблица 1 – Величина коэффициента  $\alpha$  в зависимости от температур

Температура	600 °С	700 °С	900 °С	1000 °С	1100 °С	1200 °С
$\alpha$	0,001	0,0015	0,0018	0,0022	0,0022	0,0023

Так как величина предела текучести кроме состава сплава и температуры зависит и от скорости деформации, то необходимо  $\sigma_s$  вычислять по  $\sigma_0$  при соответствующей скорости испытания. Для случая обжима на гидравлическом прессе при средней скорости перемещения инструмента 3 мм/с, предел текучести для заданной температуры следует определять по результатам испытаний при скорости деформации  $10^{-1} \div 10^{-2}$  1/с.

Необходимо отметить, что зависимость (1) лучше всего отражает действительную картину изменения предела текучести при испытании однофазных систем или чистых металлов [11].

Для более сложных сплавов с высоким содержанием легирующих элементов изменение

$\sigma_S$  зависит не только от химического состава, температуры, но и от структуры, главным образом для стали, от стабильности аустенита [10].

Выбор температуры нагрева при обжиге определяется не только условиями устойчивости заготовки, но и получением обжатого конца без задиров и других дефектов поверхности, а также получением заданной микроструктуры.

Для исследованных марок сталей при обжиге с дифференцированным нагревом оптимальным температурным интервалом является 600 – 900 °С, а допустимым 500 – 1000 °С. Это относится к тому случаю, когда коэффициент обжима достигает максимального значения в соответствии и с условием, определяющим предельный коэффициент обжима по несмыкаемости стенок [8].

$$m_{пред} = (0,107 + 3,4 S_0 / D_0)^{-1}. \quad (2)$$

Как уже сказано, выбор температурного интервала определяется рядом условий и записать этот температурный интервал в виде точной математической формулы невозможно.

На основании большого количества экспериментов для заданного температурного интервала для стальных труб определена величина допустимого коэффициента обжима [9]:

$$m \leq 1,3 \frac{\sigma_{S_H}}{\sigma_{S_K}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{S_H}$  – предел текучести при нижнем значении оптимального температурного интервала;

$\sigma_{S_K}$  – предел текучести в верхнем сечении изделия в конце деформации.

Естественно, что для каждого сплава температура начала и конца деформации определяется отдельно. Например, для широко используемых марок сталей для труб, диаметром 30 – 150 мм этот интервал составляет 500 – 1000 °С. Величина допустимого коэффициента обжима по (2) может быть принята, если для данного случая по условиям соотношений (3) предельный коэффициент обжима  $m_{пред} > m$ .

Температуру в верхней части обжатого конца можно установить в зависимости от заданного коэффициента обжима. Воспользовавшись зависимостью (1) и (3) получим температуру в верхней части очага деформации.

$$T_2 = \frac{\ln m - \ln 1,3 + \alpha_1 T_1}{\alpha_2}, \quad (4)$$

где  $\alpha_1$  – температурный коэффициент при расчетной температуре начала деформации  $T_1 = T_0 - T_H$ ;

$T_0$  – температура начала деформации, показанная термометром, фактическая температура;

$T_H = 20$  °С;  $T_2 = T_K - T_H$ ;

$T_K$  – температура на краю обжатой части.

При принятой температуре начала деформации  $T_1 = 600$  °С,  $\alpha = 0,001$  (таблица 1). Значение  $\alpha_2$  должно быть принято в соответствии с температурой конца деформации. Но, так как эта температура неизвестна, то, в первом приближении  $\alpha_2$  следует принимать в зависимости от заданного коэффициента обжима. При рекомендуемых наиболее высоких температурах при максимально допустимой деформации для углеродистых сталей  $\alpha_2$  колеблется от 0,0018 до 0,0020.

Минимальное значение  $\alpha_2$  следует принимать при  $m = 2$ , а максимальное при  $m = 5$ . При величине коэффициента обжима между 2 и 5,  $\alpha_2$  принимается соответственно между 0,0018 и 0,0020.

Подставив в (4) значения  $\ln 1,3$  и  $T_1$  получим максимальную температуру в верхней части очага деформаций при обжиге стальной заготовки:

$$T_2 = \frac{\ln m - 0,26 + \alpha_1 (T_1 - T_H)}{\alpha_2} + 20, \text{ °С} \quad (5)$$

Запись температур на осциллограмме в процессе нагрева позволила контролировать условия деформации по нагреву и получить картину распространения температуры по очагу деформации в условиях правильного (рекомендуемого) режима нагрева.

Определить температуру нагрева конца трубы из алюминиевых сплавов типа Д16 при обжиге по приведенной выше формуле (5) невозможно, так как она получена из зависимости предела текучести от температуры для сталей. В своем исследовании мы исходили из необходимости определения связи между пределом текучести и температурой для конкретного материала – сплава Д16.

Анализируя результаты выполненных нами механических испытаний сплава Д16 (рис. 1) найдена зависимость предела текучести этого сплава от температуры в пределах температур деформаций при дифференцированном нагреве при обжиге труб из этого сплава. Наиболее низкая температура начала деформации на основе опыта данных таблицы 2 принята  $T_n = 150\text{ }^\circ\text{C}$ , а максимальная температура при наибольшем коэффициенте обжига ( $m = 5$ ) на основе опыта принята  $380\text{ }^\circ\text{C}$ , при которой предел текучести составляет 40 МПа.

Таблица 2 – Механические свойства сплава Д16Т в деформированном состоянии

Параметр	Ед. измерения	150 °С	200 °С	300 °С	400 °С	500 °С
$\sigma_b$	МПа	270	250	150	86	40
$\sigma_{0,2}$	МПа	150	125	80	20	15
$\delta$	%	18	20	30	32	86

Наиболее высокая температура при обжиге с дифференцированным нагревом должна быть при максимальном коэффициенте обжига  $m_{max}$ . В связи с тем, что начальная температура при обжиге  $150\text{ }^\circ\text{C}$  расчетный предел текучести соответствующий этой температуре будет 150 МПа. По результатам экспериментов по обжигу труб из сплава Д16Т с максимальным коэффициентом обжига  $m_{max}$  от 2 до 5 предел текучести при наибольшей температуре определен как:

$$\sigma_{S_K} = K \frac{\sigma_{S_H}}{m}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{S_H}$ ,  $\sigma_{S_K}$  – предел текучести при начальной и конечной температуре обжига.

Коэффициент  $K$  может быть определен в зависимости от коэффициента  $m$  из графика на рис. 2.

Максимальному значению предела текучести  $\sigma_{S_K}$  соответствует максимальная температура  $T_K$ , которая может быть определена из зависимости (7), полученной на основе анализа графика на рис. 1.

$$T_K = \sqrt{21600 - (\sigma_{S_K} + 376)^2}. \quad (7)$$

Температуру нагрева в верхнем сечении обжигаемой заготовки нужно принимать как можно более низкой с учетом, прежде всего, обеспечения устойчивости заготовки, но также и с учетом уменьшения расхода электроэнергии на нагрев, но не ниже расчетной.

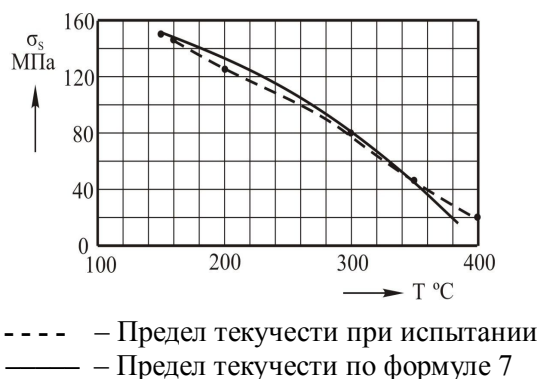


Рис. 1 – Изменение предела текучести сплава Д16Т при нагреве

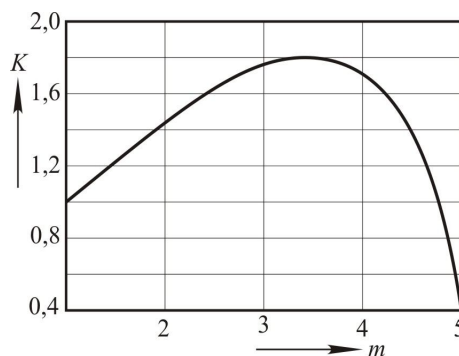


Рис. 2 – Зависимость коэффициента  $K$  от  $m$

Следует обратить внимание на то, что индукционный нагрев трубы из сплава Д16Т длится обычно 5 – 7 секунд и происходит со скоростью 40 – 80 °С/сек, поэтому процесс нагрева должен быть автоматизирован, в противном случае, не исключен пережог заготовки. Кроме этого допустимо отклонение оси заготовки от оси индуктора не более 1 – 1,5 мм. Смещение заготовки приведет к резкому перепаду температур по сечению трубной заготовки и последующей разностенностью изделия. Необходимо в условиях предварительного дифференцированного нагрева создать вращение заготовки со скоростью 40 – 60 об/мин.

Если при предварительном нагреве создать вращение невозможно по конструктивным условиям, необходимо чтобы заготовка фиксировалась калибровочным кольцом при нагреве в индукторе. При проверке температур нагрева различных зон трубы необходимо учитывать, в связи с большой скоростью нагрева, инерционность термопар и гальванометров.

#### Выводы

1. На основании анализа зависимости предела текучести от температуры и с учетом дифференцированного нагрева при обжиге концов труб из стали и сплава Д16 установлен температурный интервал деформации, позволяющий проводить операцию обжига без потери устойчивости деформируемой заготовки.
2. Для стали температура в начале очага деформации должна быть 550 – 600 °С, а в конце очага деформации зависит от свойств стали и максимального коэффициента обжига.
3. Для сплава Д16 температуры в начале очага деформации установлена 150 °С, в конце очага деформации – значением предела текучести, определенном по зависимости (6) и коэффициенту обжига.

#### Перечень ссылок

1. Горбунов М.Н. Штамповка деталей из трубчатых заготовок / М.Н. Горбунов. – М.: Машгиз, 1960. – 188 с.
2. Грудев А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: Справочник / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. – М.: Металлургия, 1982. – 309 с.
3. Исаченков Е.И. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением / Е.И. Исаченков. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
4. К вопросу о качестве баллонов высокого давления малого объема / А.Д. Кирицев, Б.С. Каргин, Р.О. Ткачев, К.Х. Казмириди, Б.А. Пионтковский // Вісник Призов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Мариуполь, 2001. – Вып. 11. – С. 154 – 158.
5. Чертавских А.К. Трение и технологические смазки при обработке металлов давлением / А.К. Чертавских, В.К. Белосевич. – М.: Металлургия, 1969. – 362 с.
6. Монченко В.П. Эффективная технология производства полых цилиндров / В.П. Монченко. – М.: Машиностроение, 1980. – 217 с.
7. Кирицев А.Д. Определение радиальной деформации при обжиге с одновременным нагревом / А.Д. Кирицев // Пластическая и термическая обработка стали. Сб. науч. трудов ЖдМИ. – М.: Металлургиздат, 1963. – Вып. XI. – С. 143 – 150.
8. Кирицев А.Д. Исследование и разработка нового технологического процесса обжига концов труб из сплава Д16 / А.Д. Кирицев, Б.С. Каргин, Р.О. Ткачев // Вестник Призов. гос. техн. ун-та: Сб. науч. тр. – Мариуполь, 1996. – Вып. 2. – С. 126 – 121.
9. Шишюкин В.П. Давление истечения металлов и их сплавов при различной температуре / В.П. Шишюкин // Журнал прикладной химии. – 1929. – Вып. 6. – Т. 2. — С. 26 – 30.
10. Зайков М.А. Режимы деформации и усилия при горячей прокатке / М.А. Зайков. – Свердловск: Металлургиздат, 1960. – 267 с.
11. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением / С.И. Губкин. – М.: Металлургиздат, Ч. I, II. – 312 с.

Рецензент: В.И. Капланов  
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 29.02.2008