

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ ПРОЦЕССА ВЫСАДКИ КОНЦОВ ТРУБ

М.В. Ерпалов, А.А. Богатов

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

Работа посвящена технологии высадки концов труб на гидравлическом прессе SMS Meer ОАО «ПНТЗ» (г. Первоуральск). С целью снижения сопротивления деформации, а также с целью локализации деформации концы труб подвергают нагреву в трех последовательно расположенных индукторах до температуры 1150–1250 °С. При этом точность нагрева концов труб как по температуре, так и по длине является одним из факторов, определяющих качество готовой продукции. В связи с важностью данного вопроса на ОАО «ПНТЗ» проведена работа по изучению температурных условий процесса высадки концов труб. Работа проведена с применением тепловизора ThermoCAM P640 и в результате изучен процесс нагрева концов насосно-компрессорных труб перед высадкой. При этом установлено, что за счет теплопроводности часть тепла от нагретого конца трубы перераспределяется в холодную часть трубы и в результате фактическая длина нагрева составляет на 80 мм меньше заданного значения. Помимо этого даны рекомендации по изменению настроек стационарных пирометров, входящих в состав оборудования прессы, с целью повышения точности их показаний. Кроме того, в работе установлено распределение температур по длине трубы после охлаждения при транспортировке заготовки от нагревательного устройства до позиции высадки и после самой операции высадки.

Ключевые слова: насосно-компрессорные трубы; высадка концов труб; нагрев; охлаждение; индуктор; тепловизор; температурные поля.

Введение

Высадкой концов труб называют технологическую операцию, осуществляемую путем осаждения конца трубы пуансоном в закрытую полость разъемных матриц и обеспечивающую увеличение толщины стенки и как следствие прочности резьбового или сварного соединения труб нефтяного сортамента [1]. Высадка концов труб производится как правило на гидравлических прессах, при этом одной из важнейших задач является обеспечение высокого уровня качества продукции. В числе основных технологических параметров процесса высадки, определяющих качество изделия, наиболее важными являются длина и температура нагрева концов труб. Неправильное назначение режимов нагрева приводит либо к преждевременному окончанию процесса высадки с образованием внутренних незаполнений калибра, либо к переполнению очага деформации, в результате чего образуется торцевой облой, а внутренний диаметр высадки становится меньше минимально допустимого. Помимо образования дефектов, условия нагрева и охлаждения труб влияют на долговечность технологического инструмента и как следствие на коэффициент полезного использования оборудования. В связи с этим исследование температурных полей в металле заготовки при высадке концов труб с целью установления оптимальных режимов нагрева является важной задачей.

Исследование процесса нагрева и охлаждения заготовок перед высадкой проведено в условиях действующего производства на гидравлическом прессе фирмы SMS Meer на ОАО «ПНТЗ» [2, 3].

Высадка концов труб осуществляется в горячем состоянии при температуре 1150–1290 °С в зависимости от марки стали. При этом нагрев осуществляется локальный в трех последовательно расположенных индукторах. Контроль температуры нагрева металла осуществляется на входе и выходе трубы из второго и третьего индукторов с помощью стационарных пирометров. По окончании нагрева конца трубы осуществляется ее транспортировка в пресс на позицию высадки, при этом происходит охлаждение металла на воздухе в течение около 8 с и в закрытом калибре, образованном матрицами, непосредственно до начала деформации еще около 4 с.

Использование стационарных пирометров для изучения температурных полей в металле заготовки является невозможным, так как они измеряют лишь максимальную температуру по всей длине нагретого конца трубы и позволяют зафиксировать одно значение температуры в момент входа и выхода трубы из индуктора. Поэтому для решения поставленной задачи использован тепловизор ThermoCAM P640 производства фирмы FLIR Systems Inc. Однако сложность применения тепловизора связана со значительным градиентом теплотехнических свойств металла, в частности степени черноты, в осевом направлении заготовки, который необходимо учитывать для получения данных о распределении температуры [4]. Для корректного учета свойств материала была найдена зависимость степени черноты на поверхности трубы от температуры нагрева. Для определения указанной зависимости использована хромель-

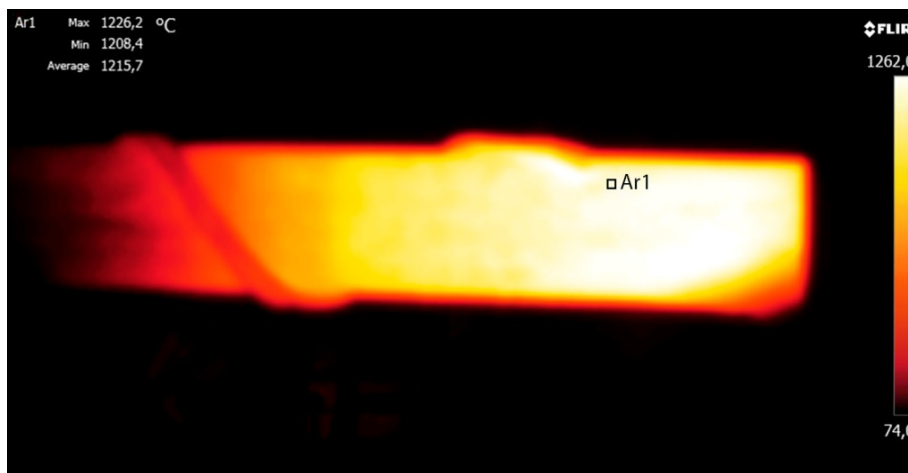


Рис. 1. К определению степени черноты материала

Результаты измерения температуры трубы с термопарой

Место замера	Показания пирометров на входе/выходе из индуктора, °C	Показания термопары, °C	Данные тепловизора	
			Средняя температура в точке контакта с термопарой, °C	Степень черноты материала ε
Перед нагревом	–	25	25	0,998
1 индуктор	–	646	646,5	0,986
2 индуктор	– / 1045	938	937,8	0,868
3 индуктор	997 / 1397	1377	1378,0	0,597
остывание 18 с	–	1215	1215,7	0,685
остывание 32 с	–	1126	1126,4	0,701

алюмелевая термопара, горячий спай которой был установлен в специально подготовленное отверстие в трубе на расстоянии примерно 100 мм от торца и был зачеканен для обеспечения надежного контакта с металлом трубы в процессе нагрева. Температурные условия процесса высадки изучены для насосно-компрессорных труб размером 73,02×5,51 мм из марки стали 30Г2, при этом длина нагрева была установлена равной 310 мм, температура – 1290 °C, время цикла нагрева в одном индукторе – 25 с.

Определение зависимости степени черноты материала от температуры

Зависимость степени черноты на поверхности трубы от температуры была установлена в процессе последовательного нагрева одной трубы в трех индукторах с установленной термопарой. Для этого на выходе из каждого индуктора, а также при дальнейшем охлаждении трубы были зафиксированы показания термопары и одновременно произведена съемка с помощью тепловизора. Обработка термограмм, полученных с помощью тепловизора, производилась в программе FLIR ResearchIR¹. В области

контакта трубы и термопары Ar1 (рис. 1) степень черноты устанавливалась таким образом, чтобы показания тепловизора соответствовали температуре, измеренной с помощью термопары. Результаты обработки термограмм приведены в таблице.

По данным таблицы видно, что в результате установки термопары система автоматики прессы не обеспечила достижения заданной температуры 1290 °C при нагреве конца трубы, о чем свидетельствуют показания стационарных пирометров 1397 °C и термопары 1377 °C. Кроме того достоверный предел измерений хромель-алюмелевой термопары не превышает 1300 °C. В связи с этим значение 1377 °C было исключено из рассмотрения. Следует также отметить, что показания пирометров в момент выхода трубы из второго индуктора 1045 °C выше соответствующего показания термопары на 107 °C.

Зависимость степени черноты от температуры была аппроксимирована зависимостью вида:

$$\epsilon = k \cdot \arctg \frac{\left(\frac{x - x_0}{a}\right)^3}{\frac{x - x_0}{a} + q} + b,$$

где $k = -0,2082$, $b = 0,672556$, $x_0 = 1350$, $a = 226,382$, $q = 5,87503$ – коэффициенты, найденные методом наименьших квадратов.

¹ Лицензия кафедры «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

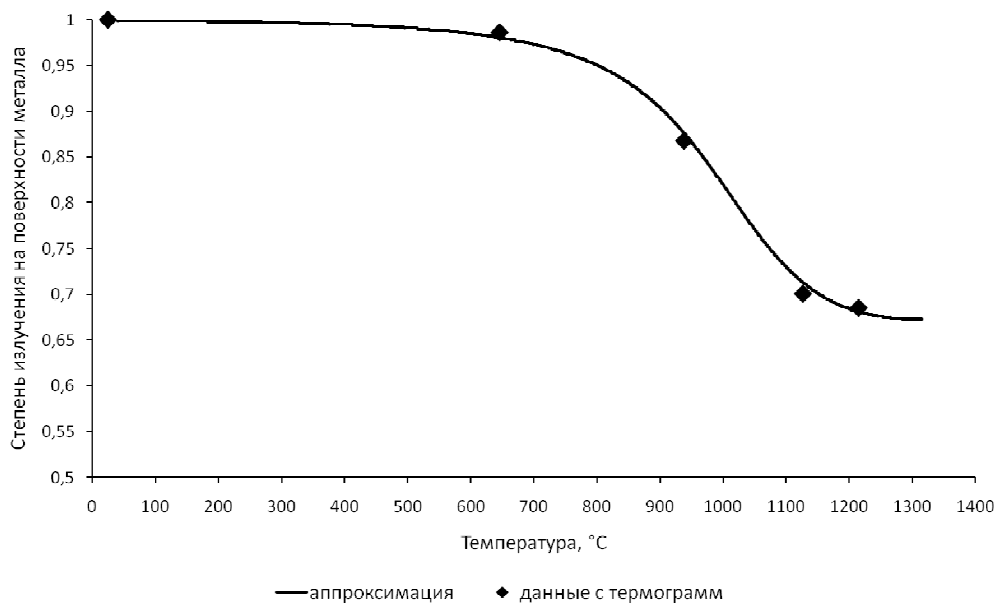


Рис. 2. Зависимость степени черноты от температуры для стали марки 30Г2

На рис. 2 представлена зависимость степени черноты на поверхности трубы от температуры.

Обратная зависимость степени черноты от температуры свидетельствует о том, что найденная степень черноты относится к неметаллическому материалу [5], а именно к окалине на поверхности трубы. Однако с учетом равенства температур поверхностной окалины и материала самой трубы, установленная зависимость дает возможность производить обработку получаемых снимков температурных полей.

Исследование температурных полей при нагреве концов труб

Анализ температурных полей в металле заготовки в процессе нагрева проведен на шести трубах. На первом этапе исследования произведена оценка точности показаний пирометров, установленных над вторым и третьим индукторами. Для этого анализ термограмм осуществлялся следующим образом. Вначале определялась максимальная температура по длине трубы при постоянном значении степени черноты, соответствующем настройке стационарных пирометров. Затем находилось максимальное значение температуры с учетом зависимости, представленной на рис. 2, при этом в связи с необходимостью установления соответствующего коэффициента излучения для разных точек термограмм температура определена дискретно с шагом около 10 мм вдоль оси трубы, начиная от торца заготовки. Результаты исследования приведены на рис. 3 и 4 для второго и третьего индукторов соответственно.

Анализируя данные, представленные на рис. 3, можно сделать следующие выводы. Во-первых, среднее по шести трубам значение температуры 1083 °C, полученное с помощью пирометров, а

также среднее значение температуры 1081 °C, полученное с помощью тепловизора без учета изменения степени черноты в процессе нагрева, соответствуют показаниям пирометров 1045 °C при выходе трубы с установленной термопарой из второго индуктора (см. таблицу). Однако они превышают соответствующее показание самой термопары 938 °C в среднем на 144 °C. Во-вторых, среднее значение температуры 923 °C, полученное с помощью тепловизора с учетом зависимости, представленной на рис. 2, хорошо согласуется с показанием термопары. Из этого следует, что настройка пирометров, установленных над вторым индуктором, является неверной и значение коэффициента излучения для них необходимо увеличить для повышения точности замера температуры трубы.

Из анализа данных, представленных на рис. 4, видно, что средние по шести трубам значения температур 1293, 1305 и 1306 °C, полученные соответственно с помощью пирометров, а также тепловизора без учета и с учетом изменения степени черноты, являются соизмеримыми. Таким образом, можно заключить, что настройка пирометров, установленных над третьим индуктором, является верной и показания температур соответствуют действительной температуре нагрева трубы.

На втором этапе исследования изучен характер распределения температуры по длине заготовки. Для этого анализ термограмм осуществлялся дискретно с шагом около 10 мм вдоль оси трубы и с учетом закона изменения степени черноты материала в процессе нагрева. На рис. 5 приведено распределение температур по длине нагретых концов шести труб. Анализ данных, представленных на рис. 5, позволяет сделать следующие выводы. Нагрев заготовок в первой паре индукторов, работающих от одного электрического преобразователя,

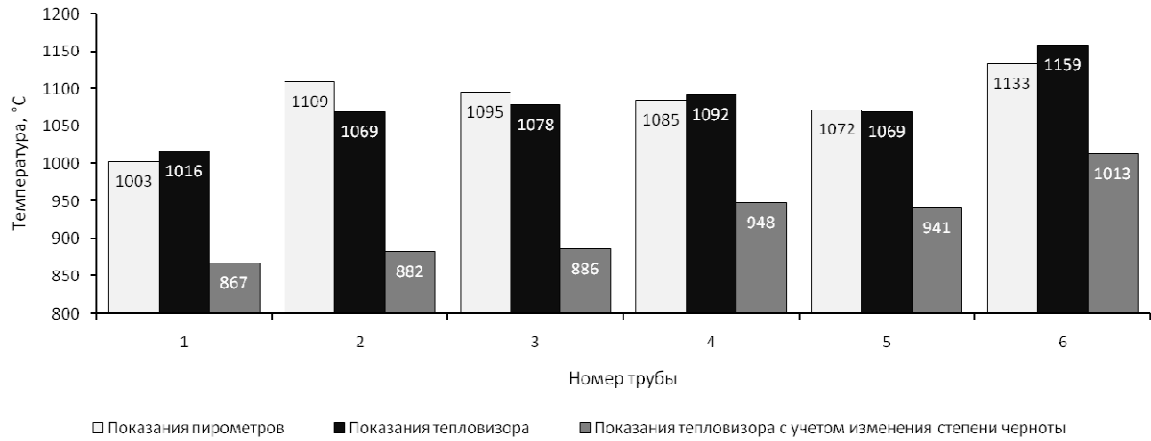


Рис. 3. Максимальная температура нагрева трубы во втором индукторе

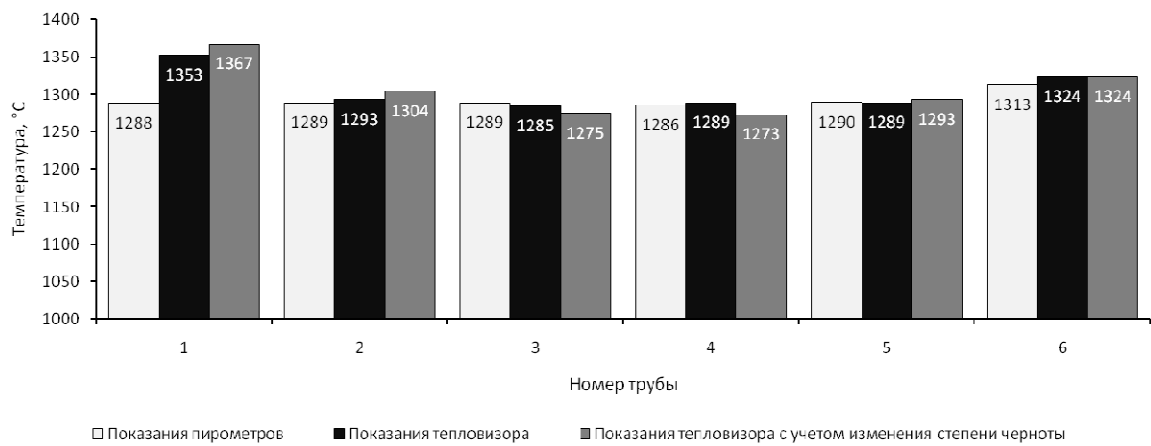


Рис. 4. Максимальная температура нагрева трубы во третьем индукторе

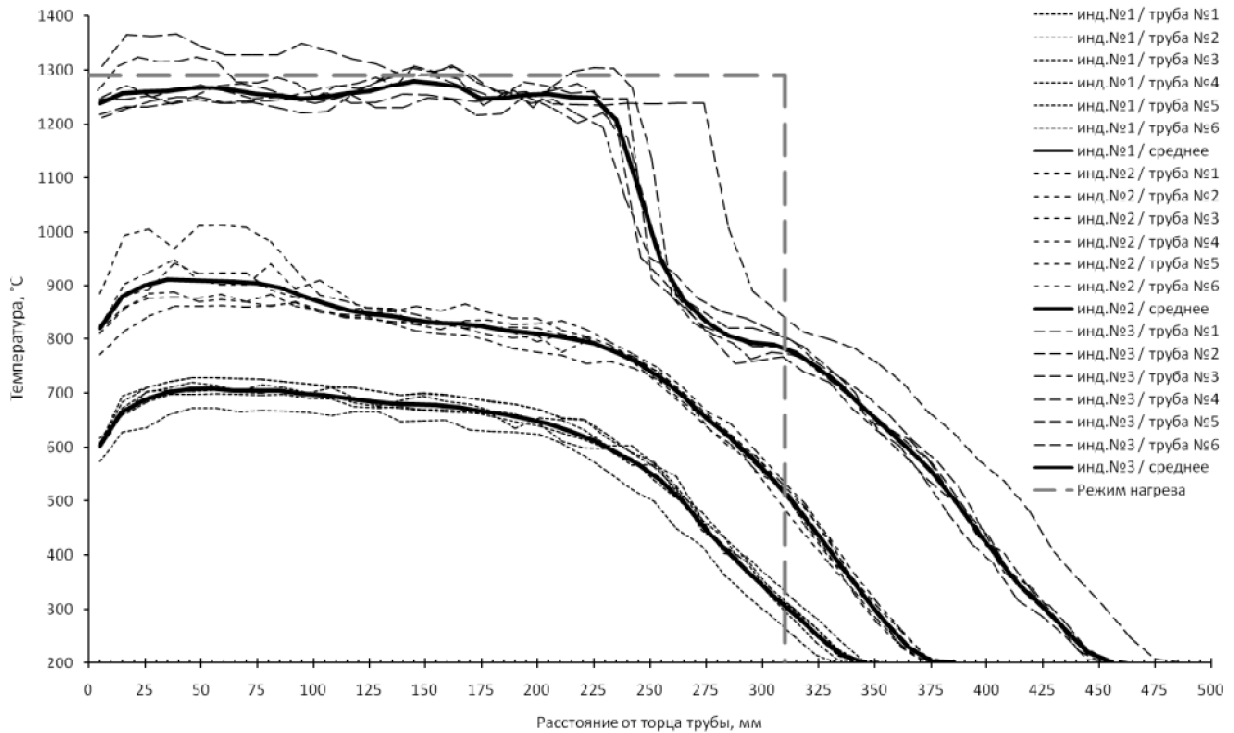


Рис. 5. Распределение температур вдоль оси трубы после нагрева в индукторах

Обработка металлов давлением

происходит до температур 800–900 °С. Средняя температура окончательного нагрева 1280 °С на выходе трубы из третьего индуктора соответствует заданной 1290 °С, несмотря на большой разброс значений от 1240 до 1340 °С. Однако фактическая длина нагрева до заданной температуры 230 мм меньше установленной 310 мм. Это связано с тем, что за счет теплопроводности часть тепла от нагретого конца перераспределяется в холодную часть трубы. В свою очередь это косвенно подтверждается опытом производства труб с высаженными концами. Так расчетная длина нагрева, обеспечивающая полное заполнение калибра, при параметрах процесса, соответствующих периоду проведения исследований, равна 250 мм. На основании этого установлено, что назначаемую величину длины нагрева заготовки следует определять по формуле:

$$l_{\text{нагр}} = l_{\text{цил.матр}} + l_{\text{кон.матр}} - l_{\text{уст}} + 80 \text{ мм},$$

где $l_{\text{цил.матр}}$ – длина рабочего цилиндрического участка матрицы; $l_{\text{кон.матр}}$ – длина конического участка матрицы; $l_{\text{уст}}$ – расстояние от торца матрицы до торца заготовки при установке последней в калибре; 80 мм – поправка, учитывающая отвод тепла за счет теплопроводности металла трубы.

Анализ потерь тепла при транспортировке труб на позицию высадки

Время транспортировки трубы после окончания нагрева в третьем индукторе до начала закрытия матриц составляет в среднем 8 с, после этого

труба еще примерно 4 с находится в закрытом калибре до начала самой деформации. За это время нагретый до заданной температуры конец трубы свободно охлаждается и поле температур претерпевает изменения. Несмотря на научный и практический интерес, возможность установить распределение температур непосредственно перед началом деформации отсутствует в связи с тем, что калибр является закрытым. Поэтому анализ потерь тепла при транспортировке труб на позицию высадки выполнен для момента времени, соответствующего началу закрытия матриц. Для обеспечения точного соответствия этому моменту времени при задаче трубы в пресс с помощью тепловизора производилась серия снимков со скоростью 30 кадров в секунду в количестве примерно 180 шт. Анализ температурных полей осуществлялся дискретно с шагом около 10 мм и с учетом закона изменения степени черноты материала.

На рис. 6 приведено распределение температур по длине трех труб, а также среднего значения температуры в момент закрытия матриц. Для оценки охлаждения металла на рис. 6 дополнительно приведено среднее распределение температур по длине заготовки после нагрева в третьем индукторе. Из графика разницы температур после нагрева и после охлаждения видно, что нагретый конец трубы охлаждается на 100–110 °С, а максимальное падение температур составляет около 150 °С. При этом охлаждение металла наблюдается на участке трубы длиной около 180 мм, начиная от торца заготовки. За этим участком следует зона металла протяженностью 30–40 мм, температура которой

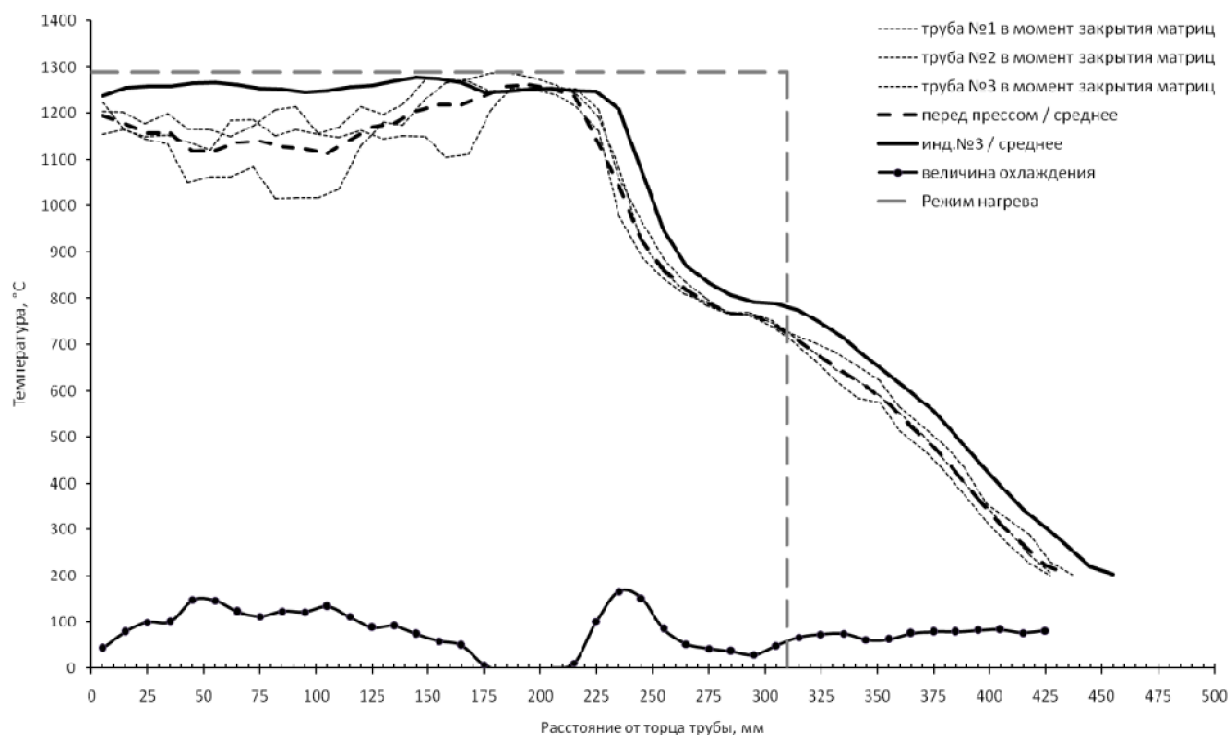


Рис. 6. Распределение температур вдоль оси трубы в момент закрытия матриц

сохраняется неизменной. Отсутствие падения температуры можно объяснить характерными условиями теплообмена, при которых отдача тепла в окружающее пространство за счет конвекции затруднена. За указанным участком трубы с неизменной температурой следует переходная зона от нагретой к холодной части заготовки. Остывание на этом участке происходит неравномерно: более горячие участки трубы охлаждаются быстрее, холодные – медленнее. Установленная в опытах неравномерность температурных полей в металле заготовки перед высадкой влияет на характер распределения деформаций в очаге деформации и может отрицательно сказываться на качестве готовой продукции.

Исследование температурных полей в металле трубы после высадки

В результате выполнения операции высадки конца трубы, сопровождающегося двумя конкурирующими процессами, а именно деформационным разогревом и отдачей тепла в холодный инструмент, происходит изменение температурных полей. Конечное распределение температур будет зависеть не только от условий нагрева, но и от режимов деформации и в большей степени от заданного времени выдержки прессы под давлением, целью которой является обеспечение наиболее полного заполнения калибра металлом. В опытной работе рассмотрен процесс высадки концов труб по следующему режиму: давление в главном гидроцилиндре высадочного прессы – 90 бар, задерж-

ка перед обратным ходом гидроцилиндра по достижении заданного давления прессования – 2,2 с. Анализ полученных термограмм проводился дискретно с шагом около 10 мм вдоль оси высаженной трубы, при этом учитывалось изменение теплофизических свойств излучающей поверхности металла.

На рис. 7 приведено распределение температур по длине двух труб, при этом за точку отсчета длины принято начало конического пояса трубы после высадки. Характерные участки высаженного конца трубы представлены на рис. 7, а их границы обозначены вертикальными линиями. Длина цилиндрического участка высаженных концов труб составила 101 и 99 мм, а их температура непосредственно после окончания высадки и раскрытия матриц равна 540–550 °С, что на 730–740 °С ниже температуры нагрева. Цилиндрические участки имеют практически постоянную температуру, за исключением области длиной около 20 мм, контактирующей с пуансоном на протяжении всего времени деформации. Конический поясок высаженного конца трубы охлаждается более интенсивно, особенно ближе к началу переходного участка трубы. Это также связано с продолжительным контактом металла с инструментом, который наступает практически сразу после начала деформации за счет потери устойчивости профиля заготовки [6]. Переходный участок высаженного конца трубы имеет изначально более низкую температуру и после операции высадки на длине 75–130 мм она составляет в среднем 500 °С. На расстоянии

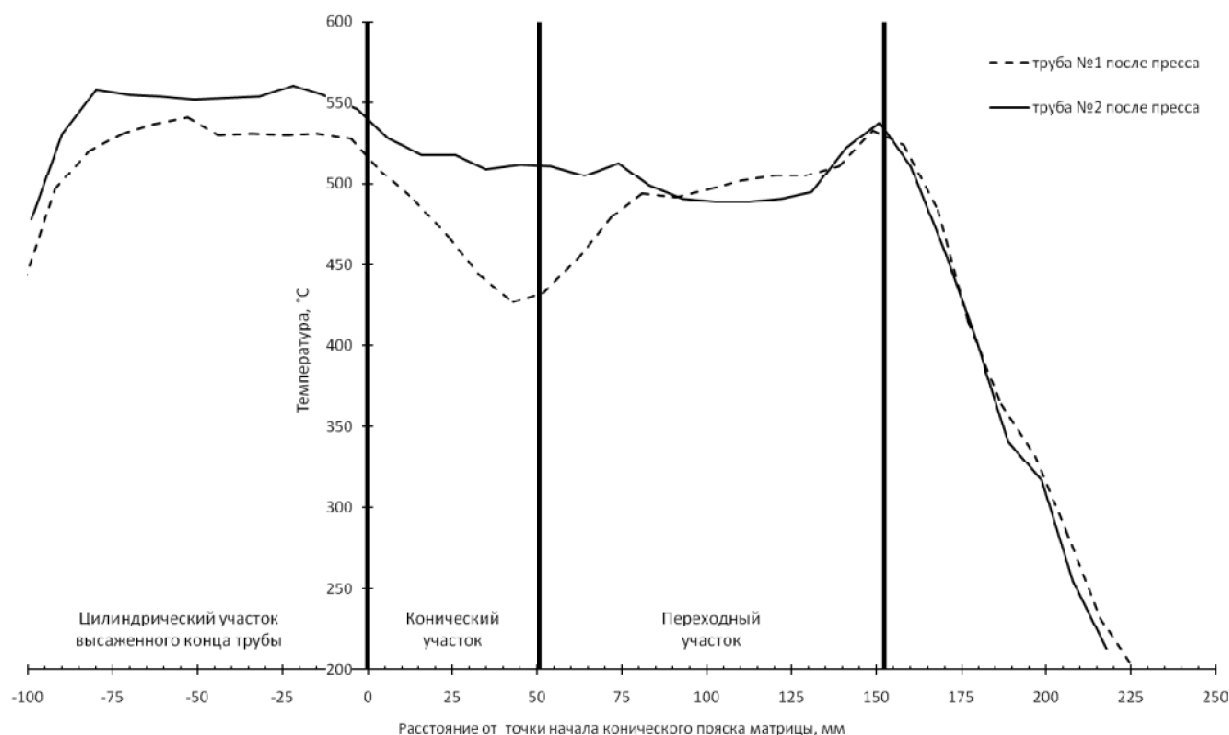


Рис. 7. Распределение температур вдоль оси трубы в момент закрытия матриц

130 мм от точки отсчета и вплоть до конца переходного участка, где контакт металла с матрицами уже не наблюдается, имеет место повышение температуры. На участке трубы более 150 мм от точки отсчета наблюдается плавное падение температуры.

Заключение

В работе изучен процесс нагрева концов насосно-компрессорных труб перед высадкой, при этом исследование проведено с учетом теплофизических свойств излучающей поверхности трубы. Кроме того установлены закономерности распределения температур по длине заготовки после охлаждения труб в процессе их транспортировки от нагревательного устройства до начала деформации, а также в процессе самой высадки. В результате установлено наличие неравномерности нагрева концов труб по длине за счет отвода тепла в холодную часть трубы и уменьшение фактической длины нагрева по сравнению с заданной на 80 мм. Показано, что настройки пирометров не обеспечивают получения достоверной информации о температуре нагрева во втором индукторе, но благодаря адаптивной системе управления прессом температура нагрева в третьем индукторе соответствует заданной.

Ерпалов Михаил Викторович, младший научный сотрудник, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; m.v.erpalov@urfu.ru.

Богатов Александр Александрович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; omd@urfu.ru.

Поступила в редакцию 6 апреля 2015 г.

DOI: 10.14529/met160114

ANALYSIS OF TEMPERATURE CONDITIONS OF THE PROCESS OF PIPE ENDS UPSETTING

M.V. Erpalov, m.v.erpalov@urfu.ru,
A.A. Bogatov, omd@urfu.ru

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

This work is devoted to the process of pipe ends upsetting on a hydraulic press SMS Meer at JSC "PNTZ" (Pervouralsk). To reduce strain resistance and to localize deformation, pipe ends are heated in three inductors up to the temperature of 1150–1250 °C. The heating accuracy of pipe ends in temperature and length is one of the factors that determine the quality of the finished product. Due to the importance of this problem, the work devoted to the study of temperature conditions of the process of pipe ends upsetting was carried out at JSC "PNTZ". This work was carried out using a thermal imager ThermoCAM P640 and as a result the process of pipe ends heating before upsetting was studied. It was found that due to heat conduction a part of heat from

the heated end of the pipe is redistributed into the pipe cold part and as a result the actual heating length is 80 mm less than the predetermined value. In addition, recommendations are given how to change the setting of stationary pyrometers to improve the accuracy of their readings. Furthermore, the work shows the temperature distribution along the pipe after cooling during the workpiece transporting from the heating device to the upsetting position and after the upsetting process itself.

Keywords: tubing; pipe ends upsetting; heating; cooling; inductor; thermal imager; thermal field.

References

1. Tkachenko V.A., Shevchenko A.A., Strizhak V.I., Pikiner Yu.S. *Truby dlya neftyanoy promyshlennosti* [The Pipes for the Oil Industry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 256 p.
2. Erpalov M.V., Kondrat'eva G.N., Bogatov A.A. [Modernization of Upset Technology of Pipe Ends in Order to Improve the Efficiency of Hydraulic Press Company SMS Meer]. *Trudy shestoy Mezhdunarodnoy molo-dezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Innovatsionnye tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii"* [Proceedings of the Sixth International Youth Scientific and Practical Conference "Innovative Technologies in Metallurgy and Machine-Building"]. Ekaterinburg, 2014, pp. 581–592. (in Russ.)
3. Erpalov M.V., Osipov I.E., Bogatov A.A. [Experimental Study of Temperature Fields in Induction Heating Pipe Ends Before Upsetting]. *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii "Truby-2014"* [Proceedings of the International Conference "Pipes 2014"]. Chelyabinsk, 2014. (in Russ.)
4. Vollmer M., Mollman K.P. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Wiley–VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011. DOI: 10.1002/9783527630868
5. Blokh A.G. *Osnovy teploobmena izlucheniem* [Fundamentals of Radiation Heat Transfer]. Moscow, Gos-energoizdat Publ., 1962. 331 p.
6. Ling K., Liu Y.K. Study on Forming Process of the Oil Pipe with Upset Ends. *Applied Mechanics and Materials*. Shiyang, China, 2013. pp. 648–651. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.456.648

Received 6 April 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ерпалов, М.В. Анализ температурных условий процесса высадки концов труб / М.В. Ерпалов, А.А. Богатов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 98–105. DOI: 10.14529/met160114

FOR CITATION

Erpalov M.V., Bogatov A.A. Analysis of Temperature Conditions of the Process of Pipe Ends Upsetting. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 98–105. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160114