

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННЫХ БЕСШОВНЫХ ТРУБ НА ОБРАЗОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ТРЕЩИН

¹Ю.Л. Бобарикин, ¹Я.И. Радькин, ²А.В. Стрельченко

¹УО «Гомельский государственный технический университет
имени П.О. Сухого»

г. Гомель, Республика Беларусь

²ОАО «БМЗ Управляющая компания холдинга «БМК»»

Г. Жлобин, Республика Беларусь

*Произведено исследование влияния режимов закалки трубного профиля 93,17*12,45 мм из стали марки ТТ309 на склонность к образованию термических трещин. Разработана численная модель процесса закалки горячедеформированных стальных бесшовных труб. При помощи численной модели определено влияние режимов термообработки на вероятность возникновения термических трещин на поверхности трубного профиля. Определено влияние отклонения геометрии трубного профиля и наличие на поверхности труб дефектов на возможность образования закалочных трещин. Экспериментально доказана корректность работы численной модели процесса закалки. Определён режим для термической обработки трубного профиля 93,17*12,45 мм из стали марки ТТ309 способствующий снижению внутренних напряжений в процессе закалки и уменьшению разности температур по сечению трубной заготовки.*

Ключевые слова: бесшовные трубы, термическая обработка, закалка, термические трещины, численное моделирование

THE RESEARCH OF THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT MODES OF HOT-DEFORMED SEAMLESS TUBES ON THERMAL CRACK FORMATION

¹Yu. Bobarikin, ¹Ya. Radkin, ²A. Strel'chenko

¹Sukhoi State Technical University of Gomel,
Gomel, Republic of Belarus

²OJSC «BSW – management company of «BMC» holding»
Zhlobin, Republic of Belarus

*The influence of hardening modes of the tube profile 93,17*12,45 mm made of steel TT309 on the tendency to form thermal cracks has been studied. A numerical model of the process of the hardening of hot-deformed steel seamless tubes has been developed. Using*

the numerical model, the influence of heat treatment modes on the probability of thermal cracks on the surface of the tube profile has been determined. The influence of the deviations in the geometry of the tube profile and the existence of the defects on a tube surface on the possibility of quenching cracks formation has been determined. The correctness of the numerical model of the hardening operation has been proved experimentally. The mode of operation for the heat treatment of the tube profile 93,17'12,45 mm made of steel TT309 has been determined, which contributes to the reduction of internal stresses during the hardening process and to the decrease in the temperature difference over the section of a tube billet.

Keywords: seamless tubes, heat treatment, hardening, numerical simulation.

E-mail: yradkin@gmail.com

Введение

В настоящее время во многих отраслях промышленности особое место занимают горячекатаные бесшовные стальные трубы. Они нашли широкое применение в авиа и машиностроении, в нефтяной и газовой промышленности в качестве бурильных, обсадных, насосно-компрессорных труб. Основные укрупненные этапы изготовления бесшовной горячекатаной трубы: получение трубной длиномерной заготовки круглого сечения, нагрев трубной заготовки, прошивка трубной заготовки на прокатном прошивном стане с целью получения полой трубной заготовки или гильзы, раскатка гильзы на непрерывном раскатном стане с целью получения черновой трубы, промежуточный нагрев черновой трубы, редуцирование черновой трубы на редуционно-растяжном прокатном стане с целью получения окончательных размеров сечения трубы, холодная правка трубы, термическая обработка редуцированной трубы с целью получения трубы с заданными механическими характеристиками, теплая правка трубы [1]. При изготовлении труб на этапе термической обработки редуцированных труб часто возникают термические трещины в стенке трубы.

Термические трещины на поверхности бесшовных труб представляют собой разрыв металла произвольной ориентации и может располагаться как на внутренней, так и наружной поверхности трубной заготовки, а в некоторых случаях может иметь вид разрыва стенки трубы.

Причиной образования трещин является неравномерность деформации стали по высоте стенки трубы на этапе раскатки и редуцирования, которая приводит к возникновению внутренних напряжений из-за разности объёмов охлаждаемых слоёв металла в процессе термической обработки. В свою очередь на величину и распределение внутренних напряжений большое влияние оказывает ряд технологических факторов производства горячедеформированных стальных бесшовных труб. Так, наличие некоторых дефектов поверхности либо отклонения геометрии трубного профиля от заданного, при которых готовая труба считается годной для эксплуатации, могут являться причиной возникновения дополнительных напряжений в объёме трубной заготовки в процессе термообработки. К таким дефектам относятся: гранёность, разностенность, поверхностные дефекты, глубина залегания которых не превышает установленных регламентом величин (рис. 1) [2].

На рис. 2 приведены характерные примеры дефектов на поверхности горячекатанных труб как концентраторов напряжений, способствующих дальнейшему их развитию в термические трещины при последующей термической обработке.

Кроме того при резком охлаждении трубной заготовки в её объёме создаются температурные напряжения, которые могут быть вызваны различием степени сжатия

между частью, охлажденной на начальных стадиях, и частью, охлажденной на поздних стадиях охлаждения, то есть имеет место неравномерность распределения температурных полей в объеме заготовки.

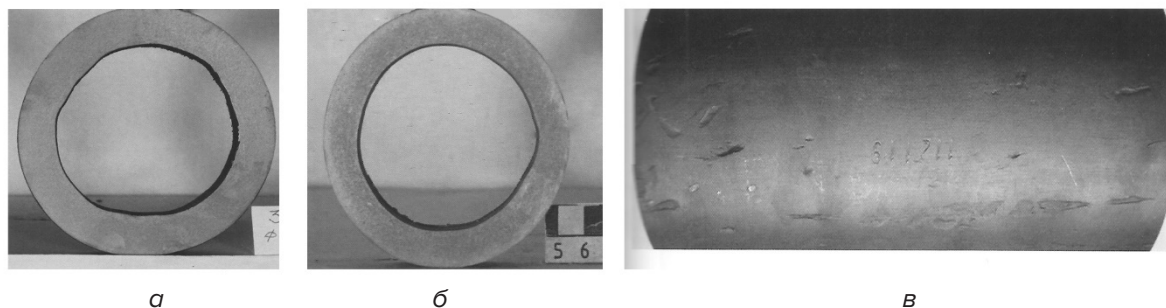


Рис. 1. Дефекты горячедеформированных бесшовных стальных труб:
а – гранёность; *б* – разностенность; *в* – дефекты на поверхности труб

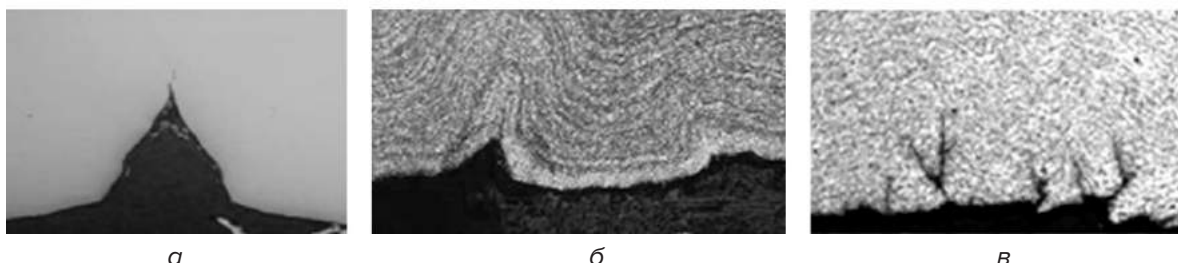


Рис. 2. Дефекты, способствующие образованию термической трещины:
а – продир; *б* – морщины; *в* – рябизна

Таким образом, стальная труба при термообработке претерпевает сложное изменение объема, приводящее к деформации и фазовым сдвигам в микрообъеме закаливаемого металла. Поиск и реализация эффективных способов снижения или устранения трещинообразования в стенке трубы на этапе термообработки путем повышения равномерности деформации и равномерности механических свойств стенки черновой трубы после раскатки и редуцирования является достаточно актуальной задачей.

Цель работы: Изучить влияния отклонений геометрических параметров трубного профиля на трещинообразование при последующей закалке и определить режимы термообработки, обеспечивающие снижение внутренних напряжений, возникающих в трубных заготовках.

Методы и исходные данные для исследования

Исходя из анализа причин образования термических трещин горячедеформированных бесшовных труб, были проведены исследования по определению влияния технологических факторов и свойств получаемых труб на вероятность образования на их поверхности термических трещин. В качестве исследуемого трубного профиля была принята труба 93,17×12,45 мм марки стали ТТ309 сорта L80 type1, химический состав сплава представлен в табл. 1.

Табл. 1

Химический состав стали ТТ309

Массовая доля элемента, %									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo
0,28	0,22	1,17	0,012	0,006	0,37	0,11	0,17	0,027	0,11

Для улучшения прочностных свойств горячедеформированных бесшовных труб финальным этапом их производства является закалка заготовки с последующим отпуском. На этапе закалки может проявиться проблема появления на поверхности труб закалочных трещин. При закалочных операциях трубные заготовки имеют более сложное напряжённое состояние в сравнении с сортовыми или листовыми заготовками. И при быстром охлаждении склонность к трещинообразованию возрастает. Как отмечалось ранее при резком охлаждении трубной заготовки достаточно трудно обеспечить однородное охлаждение всего объёма заготовки. Для повышения равномерности охлаждения трубных заготовок применяют различные методы и типы охлаждающих сред. При изготовлении труб для нефтяной промышленности с целью снижения вероятности появления трещин применяют принудительное воздушное охлаждение или медленное охлаждение туманом, однако это серьёзно сказывается на снижении производительности и ухудшении механических свойств готовых труб вследствие медленного охлаждения.

Поэтому для равномерного охлаждения трубных заготовок применяют установки наружного охлаждения, внутреннего и комбинированного.

В качестве режима термообработки трубного профиля 93,17×12,45 мм были приняты следующие параметры:

- перегрев заготовки на 50–70 °С от критической точки Ас3;
- охлаждение труб в спреерном закалочном устройстве;
- отпуск заготовки при температуре 690 °С.

Для определения оптимального режима закалки были исследованы следующие режимы охлаждения трубных заготовок (табл. 2).

Табл. 2

Режимы охлаждения трубной заготовки в процессе закалки

№	Тип охлаждения	Охлаждающая среда	Время охлаждения
1	Наружное	Вода	40 с
2	Внутреннее	Вода	40 с
3	Комбинированное	Вода	20 с на внутреннюю поверхность 2 с пауза 20 с на наружную поверхность
4	Комбинированное	Вода	20 с на наружную поверхность 2 с пауза 20 с на внутреннюю поверхность

В качестве метода исследования влияния способа охлаждения на напряжённое состояния заготовки в процессе закалки был выбран метод численного моделирования. Данный метод позволяет объединить решение задач теплопроводности, напряжённого состояния и фазовых превращений в одну и даёт возможность визуализировать поля распределения температур и напряжений во всём объёме заготовки.

Общий вид компьютерной модели представлен на рис. 3.

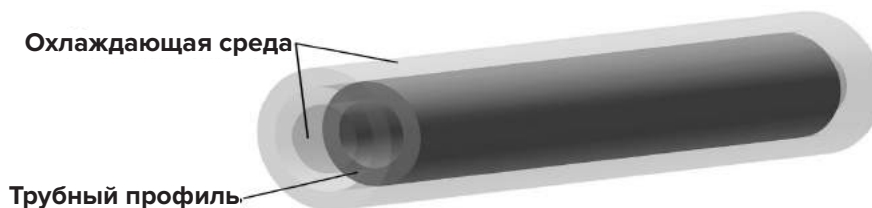


Рис. 3. Трёхмерная модель процесса закалки

Тепловую задачу для изотропного тела с учётом непостоянных теплофизических коэффициентов можно представить в виде [3]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + qv, \quad (1)$$

где c – коэффициент теплоёмкости;

ρ – плотность;

$T(x,y,z,\tau)$ – температура;

x,y,z – координаты;

τ – время;

λ – коэффициент теплопроводности;

qv – мощность удельных источников энергии.

Для описания теплообмена используются следующие граничные условия [3]:

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_n = h [T_c(\tau) - T_n(\tau)], \quad (2)$$

где n – нормаль к поверхности;

h – суммарный коэффициент теплоотдачи;

T_c – температура окружающей среды;

T_n – температура поверхности.

Для решения задачи численного моделирования выбрана формулировка Лагранжа-Эйлера, которая позволяет обеспечить требуемую точность и корректность результатов при моделировании процессов термообработки. Для материала черновой трубы принимается упругопластическая модель Мизеса [4].

Закалка трубной заготовки осуществляется путём распыления воды с температурой 24 °С, коэффициент теплопередачи из заготовки в воду подчиняется следующей зависимости (рис. 4).

Как отмечалось ранее, согласно техническим требованиям к профилю трубной заготовки имеются допуски по отклонению профиля трубы, разностенности и наличия на поверхности дефектов. Для исследования влияния отклонения геометрии профиля от заданного на склонность к трещинообразованию при термической обработке были построены следующие модели профилей трубных заготовок (рис. 5).

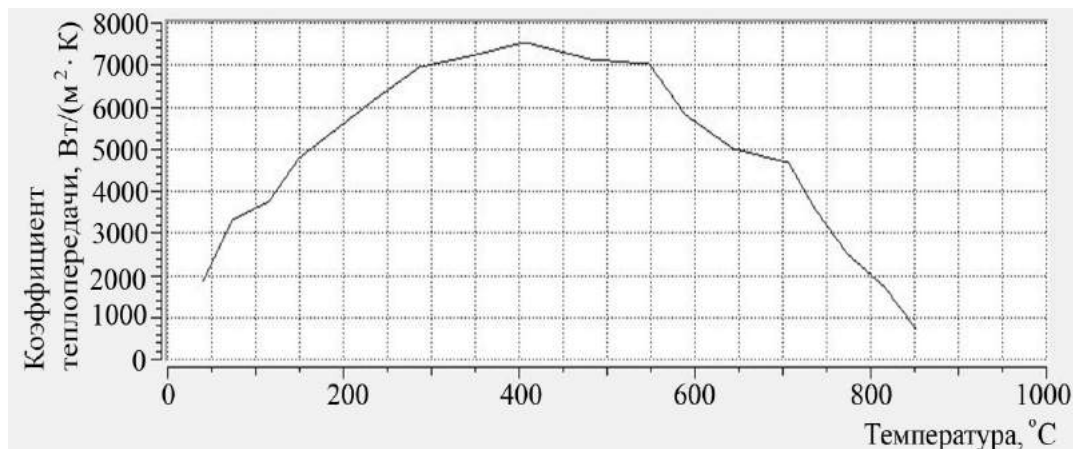


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопередачи от температуры охлаждающей воды

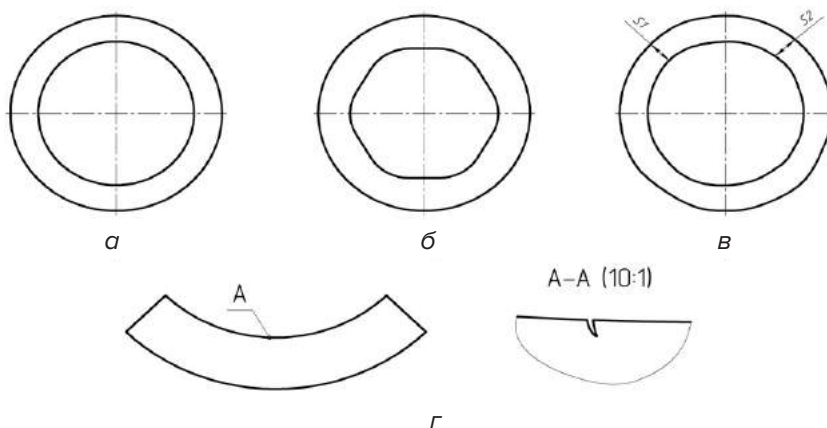


Рис. 5. Схемы для моделирования процесса термообработки трубного профиля $93,17 \times 12,45$ мм из стали марки ТТ309:
а – труба без дефекта; *б* – гранёность внутренней поверхности;
в – разностенность трубного профиля; *г* – наличие поверхностных дефектов

Результаты исследования

Были получены результаты распределения температурных полей в виде цветокодированных диаграмм внутри заготовок с различными отклонениями профиля от заданного для действующего режима закалки № 4 (табл. 2). Результат представлен на рис. 6.

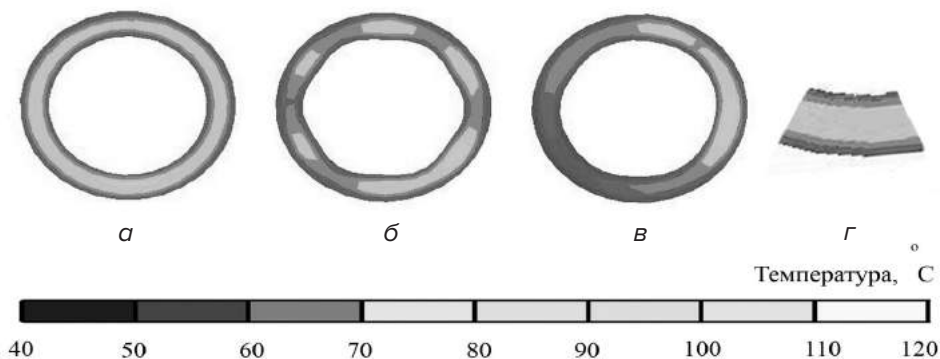


Рис. 6. Распределение температурных полей в трубном профиле $93,17 \times 12,45$ мм в процессе закалки:
а – труба без дефекта; *б* – гранёность внутренней поверхности;
в – разностенность трубного профиля; *г* – наличие поверхностных дефектов

При термообработке трубных заготовок с отклонениями геометрии профиля или разностенности в поперечном сечении труб наблюдается неравномерность распределения полей температур, это способствует увеличению возникающих в объёме металла внутренних напряжений, которые могут привести к развитию закалочных трещин.

Неравномерности в толщине стенки, как в случае с гранённостью и разностенностью, способствуют возникновению в сечении трубы знакопеременных напряжений, которые могут повлиять на появления в зонах с пиковыми значениями термических трещин.

Результаты численного моделирования процесса закалки представлены в табл. 3.

**Результаты численного моделирования заковки
трубного профиля 93,17×12,45 мм**

	Эксперимент			
	Профиль без дефектов	Гранённость	Разностенность	Поверхностный дефект
Эффективное напряжение, МПа	64	71	69	72
Разность температур, °С	73	87	84	79
Разность напряжений по сечению, МПа	42	51	49	58

Следующим этапом был проведён ряд численных экспериментов процесса заковки трубного профиля 93,17×12,45 мм с различными режимами охлаждения заготовки (табл. 2), результаты представлены в виде графиков (рис. 7–10).

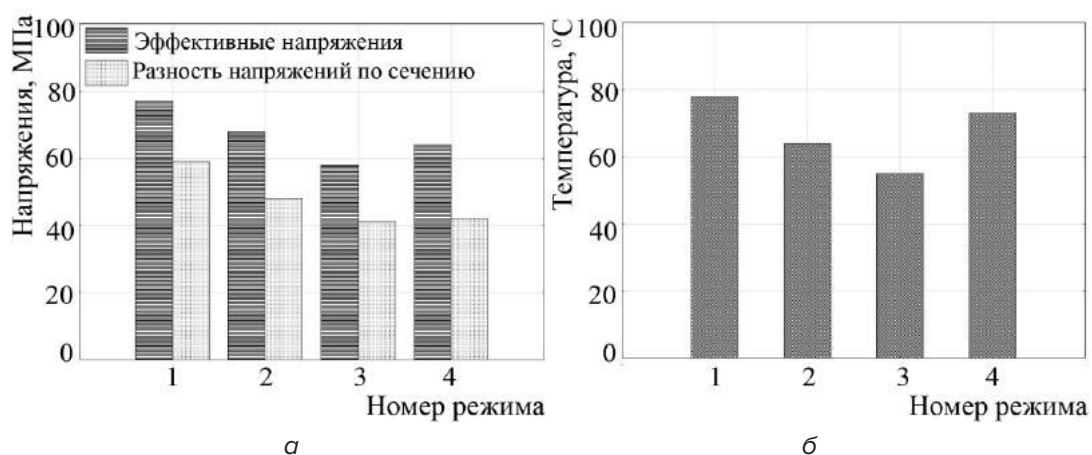


Рис. 7. Результаты моделирования заковки трубного профиля 93,17×12,45 мм (без дефектов): а – напряженное состояние трубной заготовки; б – разность температур по сечению трубы

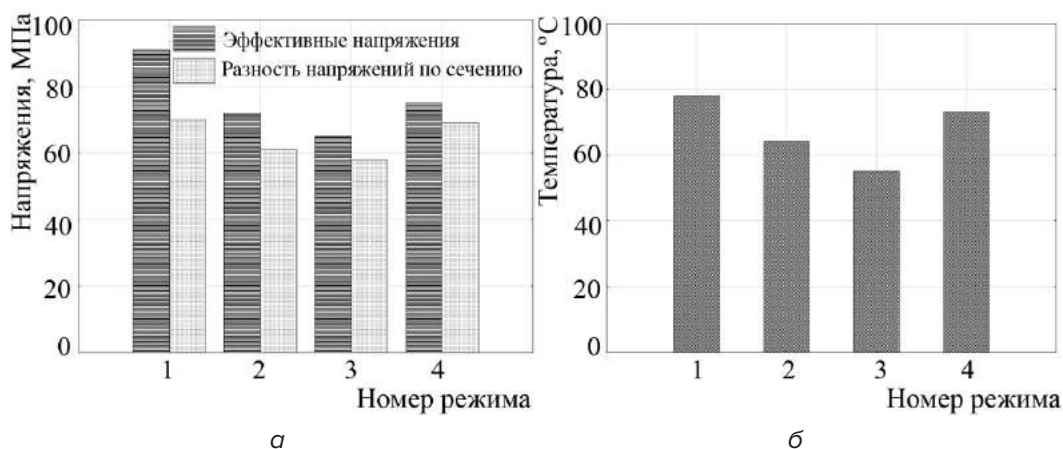


Рис. 8. Результаты моделирования заковки трубного профиля 93,17×12,45 мм (гранённость): а – напряженное состояние трубной заготовки; б – разность температур по сечению трубы

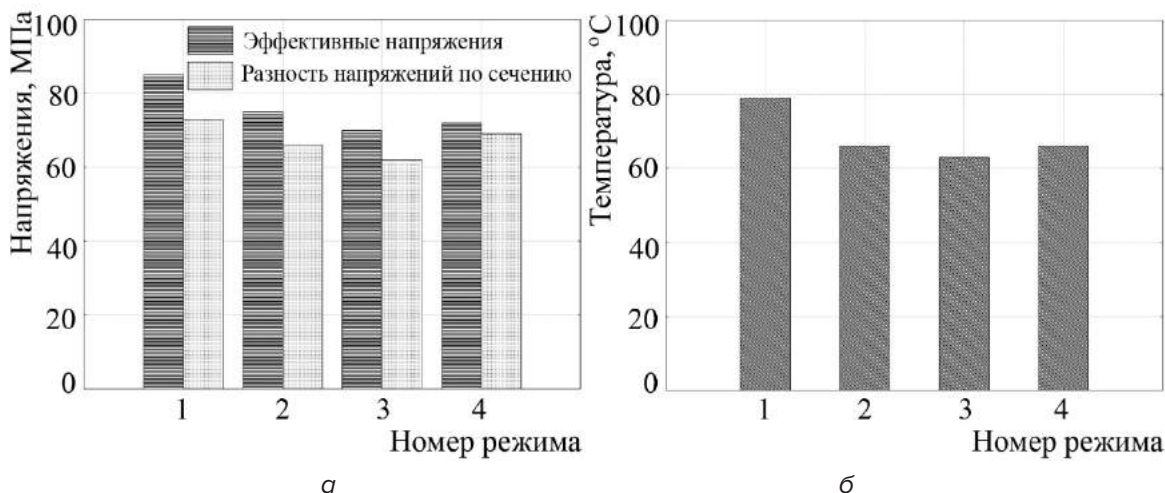


Рис. 9. Результаты моделирования закалки трубного профиля 93,17×12,45 мм (разностенность): а – напряженное состояние трубной заготовки; б – разность температур по сечению трубы

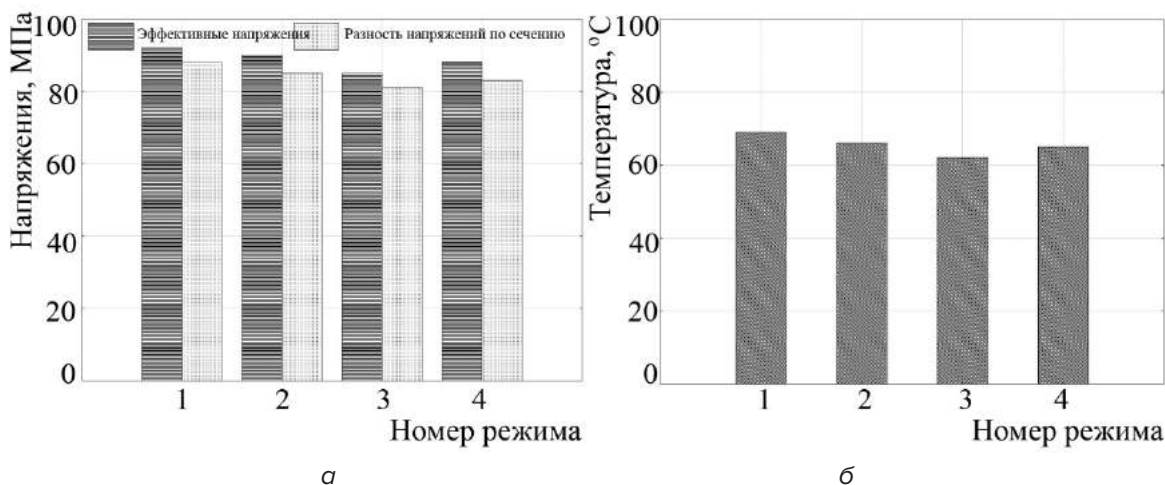


Рис. 10. Результаты моделирования закалки трубного профиля 93,17×12,45 мм (поверхностный дефект): а – напряженное состояние трубной заготовки; б – разность температур по сечению трубы

Анализируя полученные графики, можно отметить, что при применении внутреннего охлаждения наблюдается тенденция к снижению напряжений и перепадам температур по сечению трубной заготовки. Использование комбинированного охлаждения (охлаждение внутренней поверхности, пауза, затем внешней поверхности) обеспечивает минимальные напряжения, возникающие в трубе при термообработке и разность температуры по толщине стенки трубы. Применения данного режима для закалки трубного профиля 93,17×12,45 мм позволит снизить вероятность появления на поверхности закалочных трещин.

Для оценки полученных результатов численного моделирования была проведена серия экспериментов термической обработки трубного профиля 93,17×12,45 мм из стали марки ТТ309. Практический опыт показывает, что термическим трещинам наиболее подвержены трубные заготовки, на которых имеются дефекты поверхности (продеры, морщины, риски и т.д.). По этой причине для испытаний были выбраны заготовки профиля размером 93,17×12,45 мм с дефектами, располагающимися на поверхности трубного профиля (рис. 11).

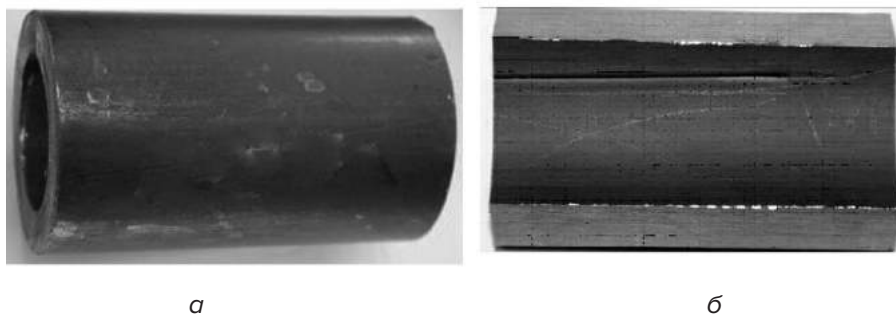


Рис. 11. Образцы для исследования режимов термообработки:
а – вид образца трубного профиля 93,17×12,45 мм; *б* – вид внутренней поверхности образца трубного профиля 93,17×12,45 мм

В настоящее время с целью получения однородной структуры и механических свойств горячедеформированных бесшовных труб при термообработке применяют комбинированные системы охлаждения, то есть обработка наружной и внутренней поверхностей труб. В качестве исследуемых режимов закалки экспериментально были обработаны режимы №3 и №4 (табл. 2).

Результат лабораторных испытаний показан на рис. 12. Микроструктурный анализ образцов показал, что при режиме закалки №4 в образце, в районе дефекта (продир), обнаружена термическая трещина с характерным подъемом прокатных линий полосчатости в зоне дефекта, максимальной глубиной залегания – 0,60 мм (рис. 12 б).

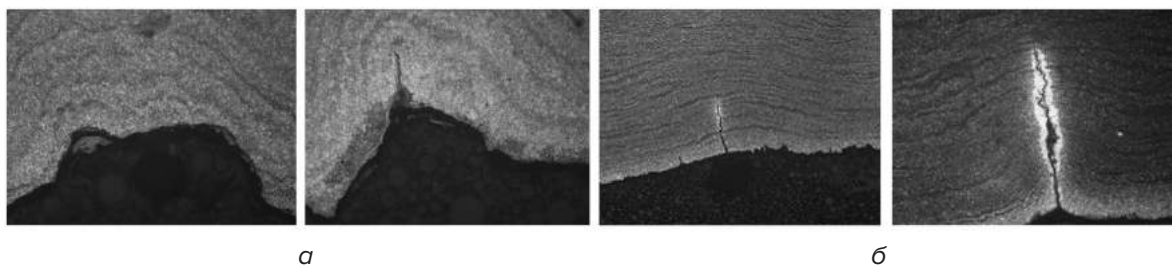


Рис. 12. Вид дефекта в поперечном сечении микрошлифов, увеличение ×100:
а – режим термообработки 3; *б* – режим термообработки 4

При режиме термообработки 3 в исследуемом образце термических трещин не обнаружено (рис. 12, *а*). Полученный результат указывает на корректность работы численной модели процесса закалки. Исходя из полученных результатов определено, что оптимальным режимом термообработки для трубного профиля 93,17×12,45 мм из стали марки ТТ309 является закалка с комбинированным охлаждением в спреерном закалочном устройстве внутренней поверхности в течение 20 с, остановки охлаждения на 2 с и охлаждении наружной поверхности в течение 20 с. Данный режим позволит уменьшить величины внутренних напряжений, возникающих в трубной заготовке, и снизить вероятность появления термических трещин на поверхности горячедеформированных бесшовных стальных труб.

Заключение

В результате работы определено влияние режимов термической обработки на склонность к трещинообразованию при закалке горячедеформированных бесшовных стальных труб.

Определен режим охлаждения трубной заготовки 93,17×12,45 мм из стали марки ТТ309 (охлаждение внутренней поверхности 20 с, пауза 2 с, охлаждение наружной

поверхности 20 с) в процессе закалки позволяющий снизить величины напряжений возникающие при термообработке в объёме заготовки, уменьшить разность температур по сечению стенки трубного профиля и способствующий снижению вероятности возникновения закалочных трещин на поверхности трубы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология трубного производства / В.Н. Данченко [и др.] М. : Интермет инжиниринг, 2002. 638 с.
2. Дефекты стальных заготовок и металлопродукции Белорусского металлургического завода : справочник-атлас / под общ. ред. Савенка А. Н. – СПб. : б. и., 2014. – 326 с.
3. Цветков, Ф.Ф.Тепломассобмен / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев // Москва, Издательский дом МЭИ, 2006. 550 с.
4. Бобарикин, Ю.Л. Адекватная численная модель процесса раскатки гильз на трёхваковом непрерывном стане и выбор метода оценки износа инструмента / Ю.Л. Бобарикин, Я.И. Радькин. – Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 3. Обработка металлов давлением / редколлегия: С.А. Астапчик (гл.ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2016. – С. 61–69.

REFERENCES

1. Danchenko, V.N. Tekhnologiya trubnogo proizvodstva [Tube production technology] / V.N. Danchenko, A.P. Kolikov, B.A. Romancev, C.B. Samusev. Moscow, Intermet inzhiniring Publ., 2002. pp. 638. (in Russian)
2. Defekty stal'nyh zagotovok i metalloprodukcii Belorusskogo metallurgi-cheskogo zavoda : spravochnik-atlas [Defects in steel billets and metal products of the Belarusian Steel works: atlas]/ under the general ed. Savenka A.N. – St. Petersburg. : B. I., 2014. - 326 p. (in Russian)
3. Tsvetkov F.F., Grigor'ev B.A. Tepломассобмен [Heat and Mass Transfer]. Moscow, MPEI publ., 2006. 550 p. (in Russian)
4. Bobarikin YU.L., Rad'kin YA.I – Adekvatnaya chislennaya model' processa raskatki gil'z na tryohvakovom nepreryvnom stane i vybor metoda ocenki iznosa instrumenta [Adequate numerical model of the shell elongating process on a three roll continuous mill and the selection of the method of the estimation of tool wear] Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: XI Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya (Minsk, September 14–16, 2016) – Minsk: PHTI NAS of Belarus, 2016;iss 3(3), P. 61–69. (in Russian).

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 17.07.2020