

# Металловедение и термическая обработка

## Physical metallurgy and heat treatment

Научная статья

УДК 620.17 (620.178.7, 620.172)

DOI: 10.14529/met220302

### ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАССОВО ПРИМЕНЯЕМЫХ МАРОК СТАЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДАХ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Д.С. Яковлев**, [Yakovlev@rosniti.ru](mailto:Yakovlev@rosniti.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2606-0314>

**В.В. Микуров**, [Mikurov@rosniti.ru](mailto:Mikurov@rosniti.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5730-3438>

**М.С. Машенцева**, [Mashentseva@rosniti.ru](mailto:Mashentseva@rosniti.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7856-3266>

АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности»

(АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия

**Аннотация.** Технологические трубопроводы работают в разнообразных условиях, находятся под воздействием значительных давлений и высоких температур, подвергаются коррозии и претерпевают периодические охлаждения и нагревы. Эксплуатируются они при различных температурах окружающей среды. Согласно общепринятой классификации, технологические трубопроводы по температуре транспортируемой среды разделяют на холодные (температура ниже 0 °С), нормальные (температура от 0 до 50 °С) и горячие (температура более 50 °С). В большинстве нормативных документов на трубную продукцию из массово применяемых марок стали определена максимальная температура эксплуатации до 80 °С. В СТО Газпром 2-4.1-713-2013 «Технические требования к трубам и соединительным деталям» верхняя граница температур эксплуатации установлена на отметке 120 °С. При этом фактическая температура транспортируемой среды может существенно превышать эти значения. На базе института было проведено исследование механических характеристик марок сталей, используемых в технологических трубопроводах, – сталь 20, 09Г2С, 13ХФА, 17Г1С-У. Проведен анализ прочностных свойств (предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение, относительное сужение) при повышенных (до +250 °С) и пониженных (до –80 °С) температурах. Выполнен анализ вязкопластических свойств при испытании на ударный изгиб образцов Шарпи, построены зависимости ударной вязкости от температуры в интервале от –100 до 0 °С. Представленные в статье результаты позволяют лучше понять влияние температуры эксплуатации на механические свойства трубопровода из различных марок стали.

**Ключевые слова:** трубопровод, температура эксплуатации, механические свойства, испытание на растяжение, испытание на ударный изгиб, прочностные свойства, вязкопластические свойства

**Для цитирования:** Яковлев Д.С., Микуров В.В., Машенцева М.С. Особенности механических характеристик массово применяемых марок стали, используемых в технологических трубопроводах в интервале температур эксплуатации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2022. Т. 22, № 3. С. 11–27. DOI: 10.14529/met220302

## FEATURES OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF HIGH-VOLUME APPLIED STEEL GRADES USED IN INDUSTRIAL PIPELINE IN THE OPERATING TEMPERATURE INTERVAL

**D.S. Yakovlev**, [Yakovlev@rosniti.ru](mailto:Yakovlev@rosniti.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2606-0314>

**V.V. Mikurov**, [Mikurov@rosniti.ru](mailto:Mikurov@rosniti.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5730-3438>

**M.S. Mashentseva**, [Mashentseva@rosniti.ru](mailto:Mashentseva@rosniti.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7856-3266>

*The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia*

**Abstract.** Industrial pipelines operate in a variety of conditions, are under the influence of significant pressures and high temperatures, are subject to corrosion and experience periodic cooling and heating. They are operated at different ambient temperatures. According to the generally accepted classification, technological pipelines are divided according to the temperature of the transported medium into cold (temperature below 0 °C), normal (temperature from 0 to 50 °C) and hot (temperature over 50 °C). In most regulatory documents for pipe products from massively used steel grades, the maximum operating temperature is determined of up to 80 °C. In the company standard Gazprom 2-4.1-713-2013 “Technical requirements for pipes and fitting parts”, the upper limit of operating temperatures is set at 120 °C. At the same time, the actual temperature of the transported medium may significantly exceed these values. The Institute has conducted a study of the mechanical characteristics of steel grades used in process pipelines – Steel 20, 09Г2С, 13ХФА, 17Г1С-У. The analysis of strength properties (yield strength, tensile strength, percentage elongation, percentage reduction) at elevated (up to plus 250 °C) and lowered (down to minus 80 °C) temperatures was carried out. The analysis of viscoplastic properties during the impact bending test of Sharpie samples was carried out, the dependences of the impact strength on temperature in the range from minus 100 to 0 °C were constructed. The results presented in the article allow us to better understand the influence of operating temperature on the mechanical properties of pipelines made of various grades of steel.

**Keywords:** pipelines, operating temperature, mechanical characteristic, tensile testing, impact bending test, strength properties, viscoplastic properties

**For citation:** Yakovlev D.S., Mikurov V.V., Mashentseva M.S. Features of mechanical characteristics of high-volume applied steel grades used in industrial pipeline in the operating temperature interval. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2022;22(3):11–27. (In Russ.) DOI: 10.14529/met220302

### Введение

Наиболее широко используемая группа сталей – низкоуглеродистая, подходит для случаев, когда коррозионная активность среды или температурное воздействие относительно невелики. Их используют в конденсаторах, теплообменниках, котлах и т. д. Широкому распространению низкоуглеродистых сталей способствует их низкая стоимость, хорошие эксплуатационные свойства и хорошая свариваемость.

Стандартные низкоуглеродистые низколегированные стали применяют в трубах различного назначения. Согласно литературным данным [1] низкоуглеродистые стали применяются в трубопроводах низкого давления при температуре до 425 °C или до 540 °C на короткий период времени. В технических требованиях к трубопроводам пара и горячей

воды допускается эксплуатация труб из углеродистых, низколегированных марганцовистых и кремнемарганцовистых сталей до температуры 400 °C. При этом нормируемой характеристикой является только условный предел текучести при остаточной деформации 0,2 %, а временное сопротивление, относительное сужение и удлинение определяются как справочные данные. ГОСТ 32569–2013 «Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производствах» [2] допускает применение исследуемых марок сталей до температур не менее 300 °C. При длительной работе трубопроводов с большей температурой среды в сталях развивается ползучесть, окалинообразование и графитизация, которые существенно снижают их прочностные характеристики.

Что касается механических характеристик исследуемых сталей при пониженных температурах, наиболее широко они исследованы для динамической нагрузки и в значительно меньшей степени – для статической.

В работе проведен анализ прочностных свойств (предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение, относительное сужение) массово применяемых марок сталей – сталь 20, 09Г2С, 13ХФА, 17Г1С-У при повышенных (до +250 °С) и пониженных (до –80 °С) температурах. Выполнен анализ вязкопластических свойств при испытании на ударный изгиб образцов Шарпи, построены зависимости ударной вязкости от температуры в интервале от –100 до 0 °С.

#### Объект исследования

Для проведения исследований были представлены пробы от типоразмеров труб различных производителей, представленных в таблице.

В соответствии с требованиями НД к эксплуатационным свойствам трубопровода был определен следующий комплекс испытаний:

1) оценка вязкопластических свойств при испытании на ударный изгиб образцов Шарпи из сталей марок 20, 09Г2С, 13ХФА, 17Г1С-У в интервале температур от –100 до 0 °С;

2) оценка прочностных свойств (предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение, относительное сужение) сталей марок 20, 09Г2С, 13ХФА, 17Г1С-У при пониженных температурах: 0, –20, –40, –60, –80 °С;

3) оценка прочностных свойств (предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение, относительное сужение) сталей марок 20, 09Г2С, 13ХФА, 17Г1С-У при повышенных температурах: 120, 150, 180, 220, 250 °С.

#### Оценка вязкопластических свойств при испытании на ударный изгиб при отрицательных температурах в интервале от –100 до 0 °С

Определение критического интервала температур хладноломкости материала заключается в построении зависимостей ударной вязкости или соотношения хрупкой и вязкой составляющих в изломах ударных образцов от температуры испытания [3–6].

В результате испытаний определена поглощённая энергия удара, ударная вязкость, построены графические зависимости ударной вязкости от температуры испытания.

Зависимость ударной вязкости от температуры испытания, построенная по средним значениям испытаний серии из трёх образцов, представлена на рис. 1.

На рис. 1 видно, что образцы из стали марки 09Г2С показали достаточно высокий уровень значений ударной вязкости во всем температурном интервале испытаний. Ударная вязкость плавно снижается при понижении температуры испытаний. Излом образцов полностью вязкий до температуры –70 °С. При температурах испытания ниже –70 °С в изломе образцов наряду с вязкой составляющей наблюдается и хрупкая.

Краткая информация об объектах исследования  
Brief information about the objects of study

№ п/п	Типоразмер, мм	Наименование	Временное сопротивление $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести условный $\sigma$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
1	325×10	Сталь 20 по ГОСТ 8732–78 гр. В	$\geq 412$	$\sigma_{0,2} \geq 245$	21
2	273×18	Сталь 09Г2С по ТУ 14-3Р-1128-2007, группы прочности К48	470–590	$\sigma_T \geq 245$	21
3	273×14	Сталь 13ХФА по ТУ 1317-006.1-593377520-2003, группы прочности К52	$\geq 510$	$\sigma_T = 372–491$	23
4	530×8	Сталь 17Г1С-У по ГОСТ 20295–85, группы прочности К52	$\geq 510$	$\Sigma_{2T} \geq 353$	20

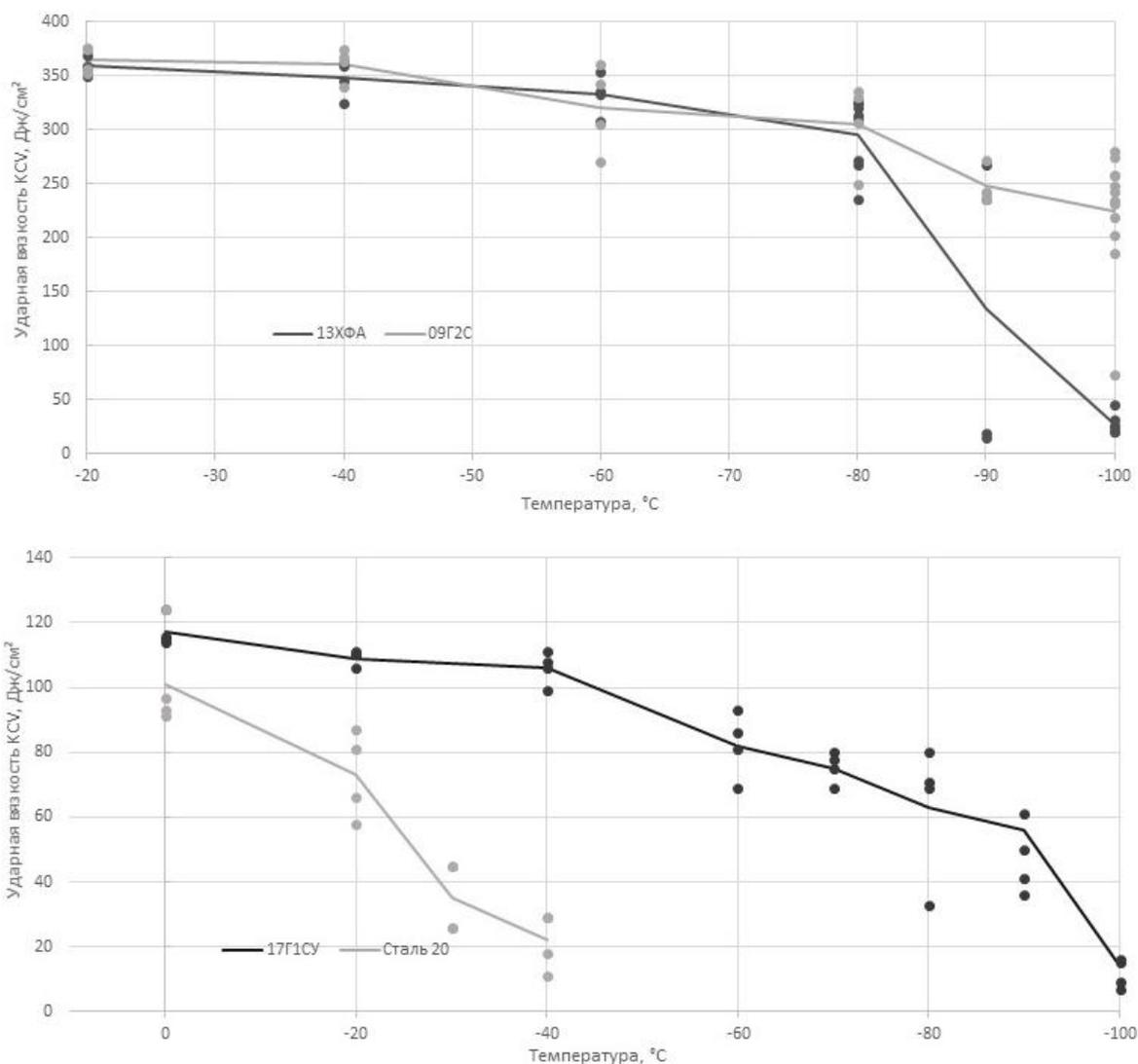


Рис. 1. Зависимость ударной вязкости от температуры испытания образцов из сталей марок 13ХФА и 09Г2С, 17Г1СУ и сталь 20  
Fig. 1. Dependence of impact strength on the temperature of testing samples from steel grades 13KhFA and 09G2S, 17G1SU and Stal 20

Образцы из стали марки 13ХФА имеют высокие показатели ударной вязкости до температуры  $-80^{\circ}\text{C}$ . При понижении температуры испытания ниже  $-80^{\circ}\text{C}$  вязкопластические свойства резко снижаются – порог хладноломкости металла находится в интервале температур от  $-90$  до  $-80^{\circ}\text{C}$ . Снижение температуры испытания приводит к увеличению доли хрупкой составляющей в изломе образцов вплоть до 100 % при  $-100^{\circ}\text{C}$ .

Анализируя результаты испытаний образцов из стали марки 17Г1С-У, установили, что температурный порог хладноломкости находится в интервале температур от  $-100$  до  $-90^{\circ}\text{C}$ . В изломах ударных образцов присутствуют расщепления, количество и длина которых с понижением температуры существ-

венно изменяется. Наличие расщеплений, вероятно, связано с качеством рулонного проката, из которого были изготовлены трубы. При температуре  $-80^{\circ}\text{C}$  длина расщеплений становится меньше, в изломе присутствует как вязкая, так и хрупкая составляющие. При температуре  $-100^{\circ}\text{C}$  излом образцов полностью хрупкий.

Образцы из стали 20 показали невысокие значения ударной вязкости в испытанном интервале температур. На рис. 1 видно, что с понижением температуры испытания ударная вязкость довольно резко снижается. Испытания при температуре ниже  $-40^{\circ}\text{C}$  не проводили, так как при указанной температуре ударная вязкость уже имела крайне низкие значения, а изломы образцов были полностью

хрупкие. Температурный порог хладноломкости стали 20 находится в интервале температур от  $-30$  до  $-20$  °С.

**Оценка прочностных свойств  
в интервале температур от  $+20$  до  $-80$  °С**

Испытание на статическое растяжение проводили на пятикратных цилиндрических образцах. Цилиндрические образцы вырезали

из середины толщины стенки трубы. Образцы были изготовлены из труб сталей марок 20, 13ХФА, 09Г2С, 17Г1С-У в продольном направлении. Графики испытанных образцов представлены на рис. 2–13.

Из рис. 5 видно, что форма диаграмм растяжения продольных образцов из стали марки 17Г1С-У практически не изменяется с понижением температуры. При температурах

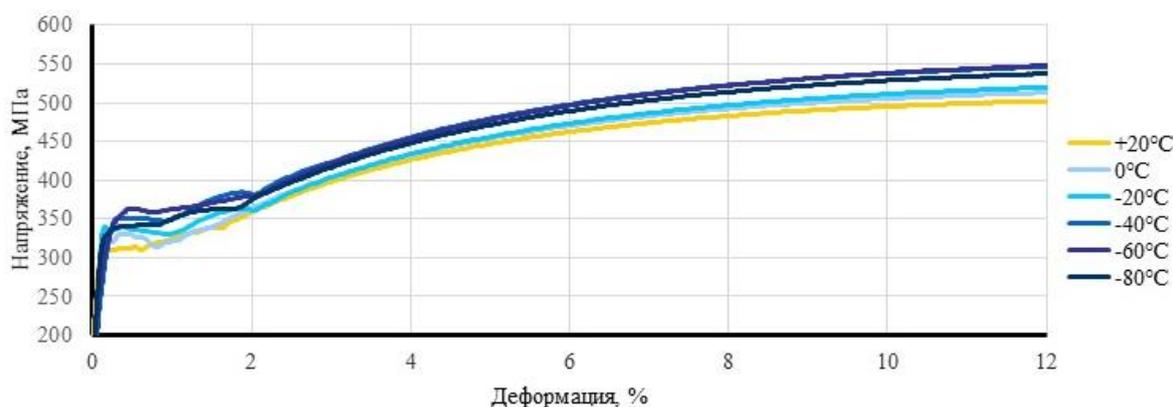


Рис. 2. Диаграммы растяжения продольных образцов стали 20  
Fig. 2. Diagrams of tension of longitudinal samples of steel 20

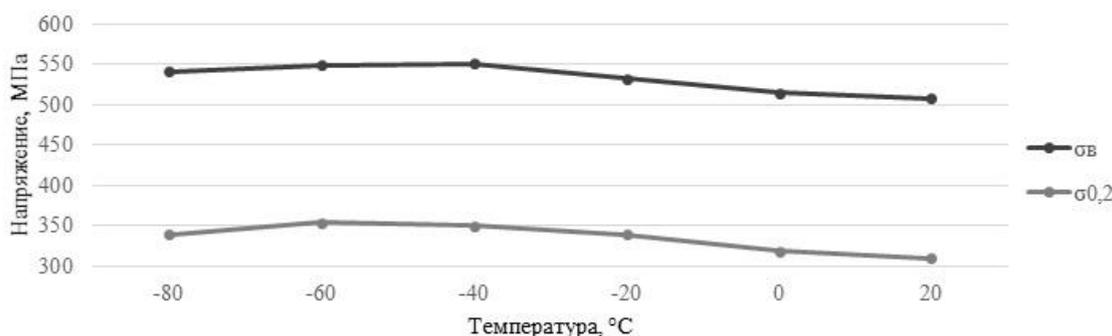


Рис. 3. Зависимость от температуры временного сопротивления и предела текучести продольных образцов стали 20  
Fig. 3. Dependence on temperature of temporary resistance and yield strength of longitudinal samples of steel 20

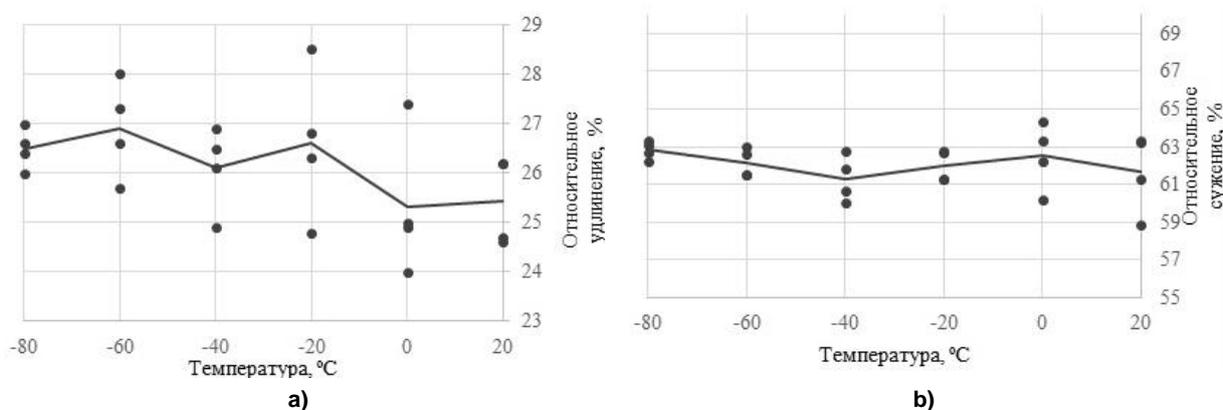


Рис. 4. Зависимость от температуры относительного удлинения (а) и относительного сужения (b) продольных образцов из стали 20  
Fig. 4. Temperature dependence of relative elongation (a) and relative narrowing (b) of longitudinal specimens made of steel 20

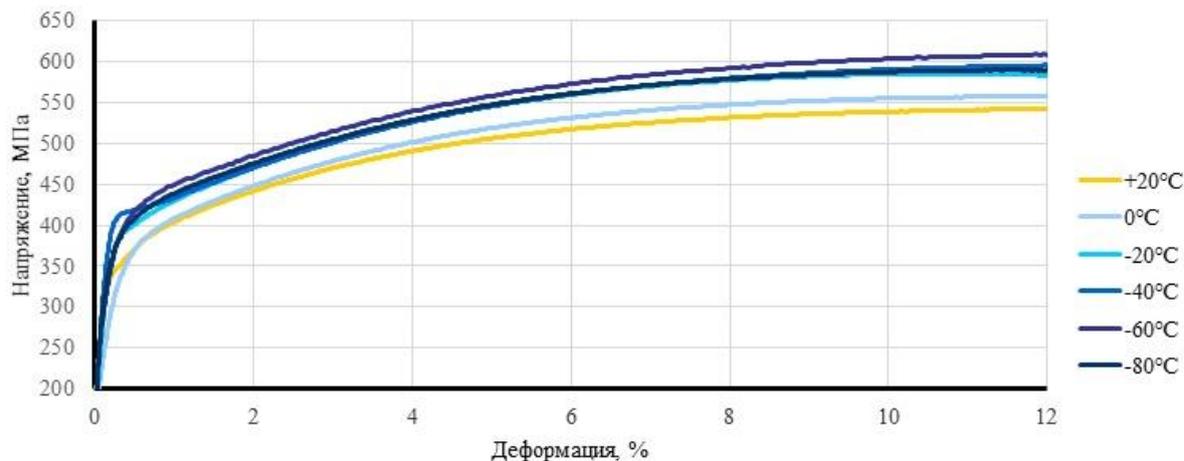


Рис. 5. Диаграммы растяжения продольных образцов стали 13ХФА  
Fig. 5. Diagrams of tension of longitudinal specimens of steel 13KhFA

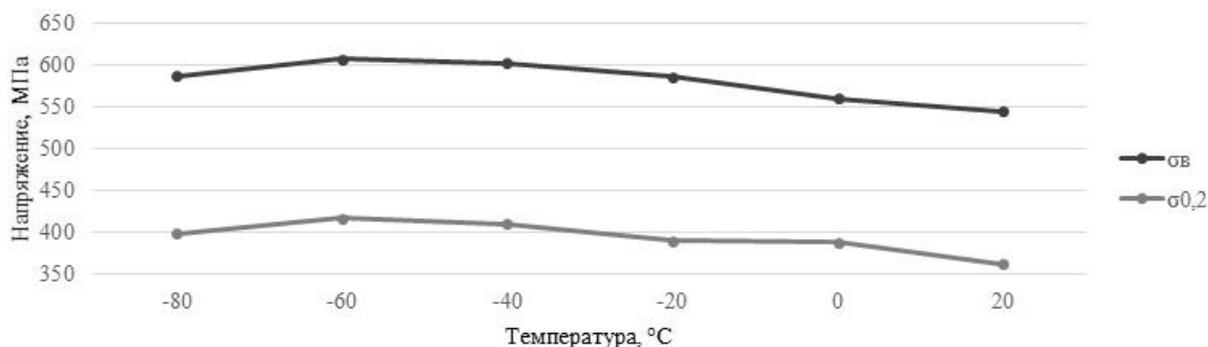


Рис. 6. Зависимость от температуры временного сопротивления и предела текучести продольных образцов стали 13ХФА  
Fig. 6. Temperature dependence of the tensile strength and yield strength of longitudinal specimens of steel 13KhFA

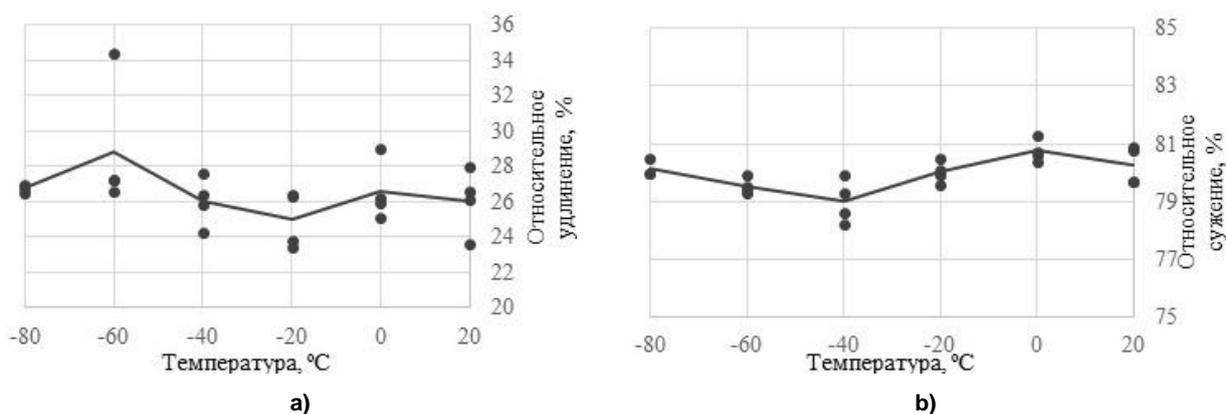


Рис. 7. Зависимость от температуры относительного удлинения (а) и относительного сужения (b) продольных образцов из стали 13ХФА  
Fig. 7. Temperature dependence of relative elongation (a) and relative narrowing (b) of longitudinal specimens made of steel 13KhFA

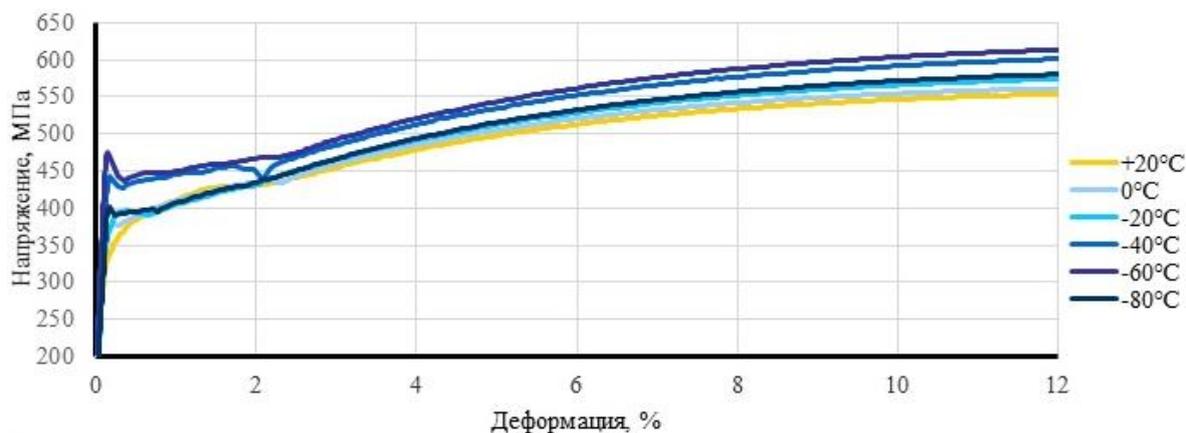


Рис. 8. Диаграммы растяжения продольных образцов стали 09Г2С  
Fig. 8. Diagrams of tension of longitudinal specimens of steel 09G2S

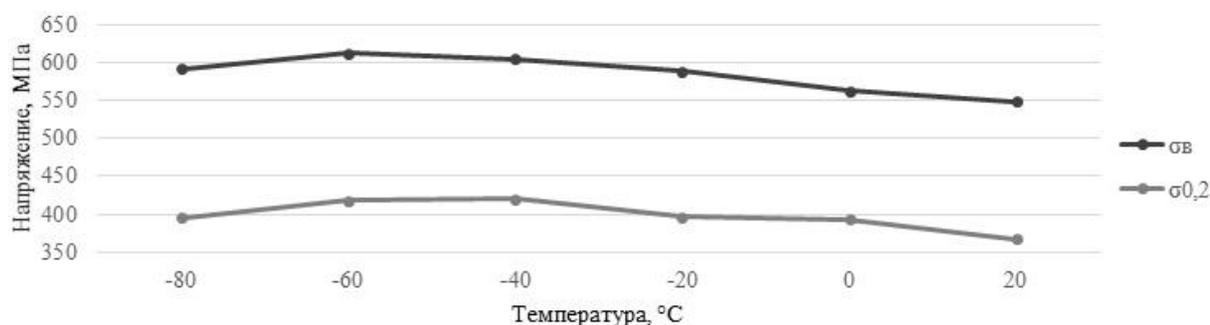


Рис. 9. Зависимость от температуры временного сопротивления и предела текучести продольных образцов стали 09Г2С  
Fig. 9. Dependence on temperature of temporary resistance and yield strength of longitudinal specimens of steel 09G2S

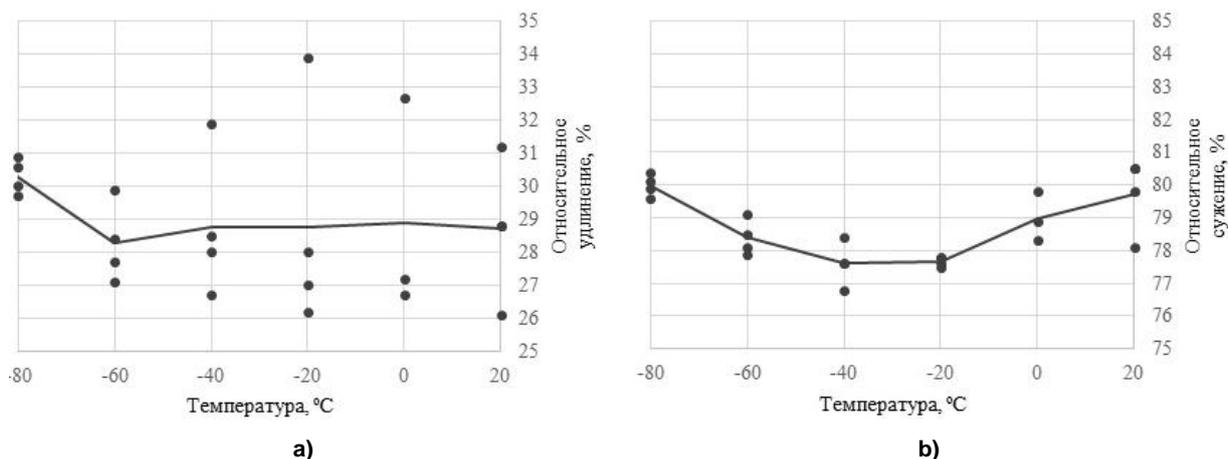


Рис. 10. Зависимость от температуры относительного удлинения (а) и относительного сужения (b) продольных образцов из стали 09Г2С  
Fig. 10. Temperature dependence of relative elongation (a) and relative narrowing (b) of longitudinal specimens made of steel 09G2S

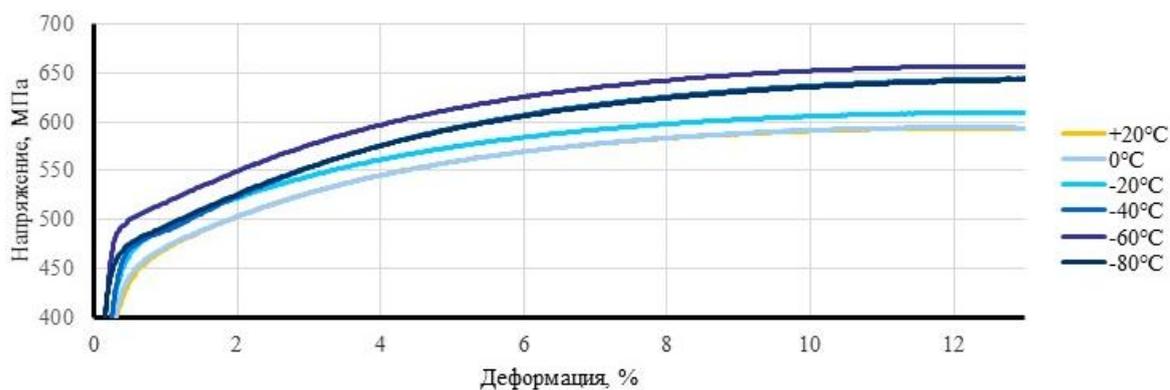


Рис. 11. Диаграммы растяжения продольных образцов стали 17Г1С-У  
Fig. 11. Diagrams of tension of longitudinal specimens of steel 17G1S-U

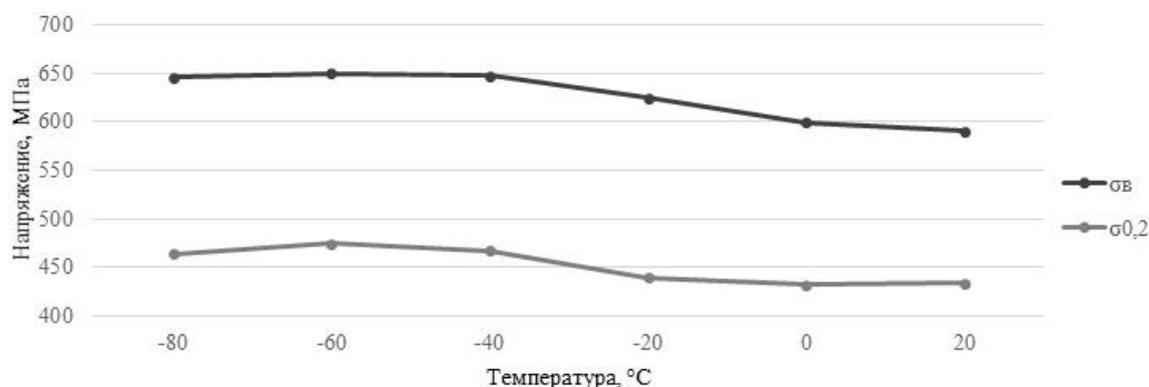


Рис. 12. Зависимость от температуры временного сопротивления и предела текучести продольных образцов стали 17Г1С-У  
Fig. 12. Temperature dependence of tensile strength and yield strength of longitudinal specimens of steel 17G1S-U

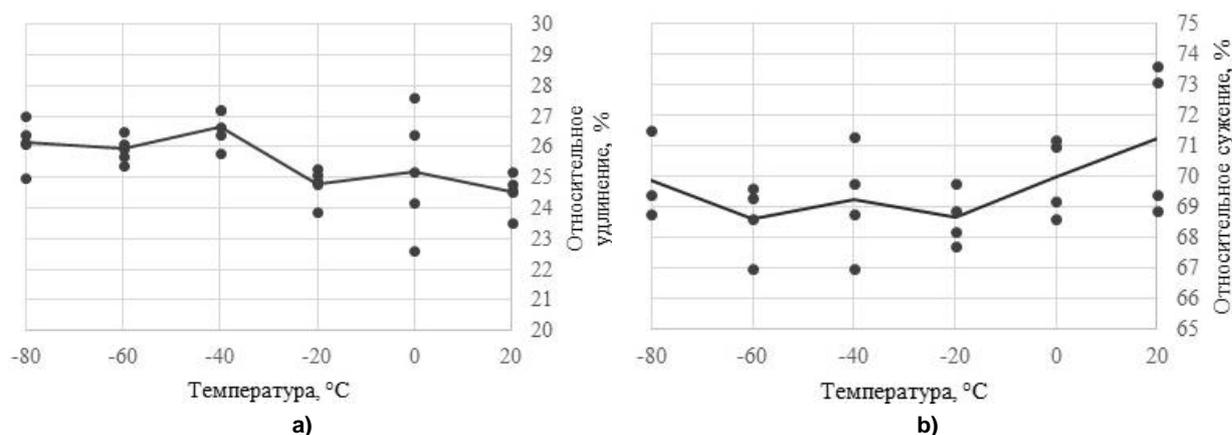


Рис. 13. Зависимость от температуры относительного удлинения (а) и относительного сужения (б) продольных образцов из стали 17Г1С-У  
Fig. 13. Temperature dependence of relative elongation (a) and relative narrowing (b) of longitudinal specimens made of steel 17G1S-U

+20 °C и 0 °C, а также -40 °C и -80 °C диаграммы практически полностью совпадают.

Рис. 2 и 8 демонстрируют плавное повышение предела текучести и временного сопротивления с понижением температуры испытаний.

Рост предела текучести и временного сопротивления произошел при испытании стали 17Г1С-У (см. рис. 11).

При понижении температуры испытания на статическое растяжение наблюдается слабовыраженная тенденция к росту предела те-

кучести и временного сопротивления, при этом относительное удлинение и относительное сужение практически не изменяются в исследуемом интервале температур.

Из рис. 3, 4, 6, 7, 9, 10, 12 и 13 видно, что удлинение и сужение незначительно изменяются во всем исследуемом интервале температур.

С понижением температуры испытания тип диаграмм растяжения существенно не меняется, при этом прочность возрастает. Наибольший рост предела текучести  $\sigma_{0,2}$  и временного сопротивления  $\sigma_b$  наблюдается на образцах из стали марок 20 и 13ХФА. Он составляет порядка 18 и 15 % соответственно. Временное сопротивление повышается менее интенсивно по сравнению с пределом текучести, следовательно, снижается и их отношение при снижении температуры.

Относительное удлинение  $\delta_5$  и относительное сужение  $\Psi$  изменяются неявно с понижением температуры испытания. Основной тенденцией является незначительный рост относительного удлинения и слабослаженное снижение значения относительного сужения с понижением температуры испытания.

#### **Испытание на растяжение при повышенных температурах**

При повышении температуры прочность материала в большинстве случаев уменьшается, а пластичность увеличивается. Общее снижение прочности и повышение пластичности металлов при высоких температурах может быть связано с влиянием температуры на деформацию материала. При комнатной температуре пластическая деформация возникает при скольжении дислокаций в материале. Дислокации пересекаются и накапливаются по мере скольжения. Такое накопление дислокаций ограничивает скольжение и, следовательно, увеличивает силы, необходимые для продолжения деформации. Этот процесс называют деформационным упрочнением. Накопление энергии деформации в результате деформационного упрочнения снижается при повышении температуры. Процесс значительно ускоряется за счёт увеличения подвижности атомов при более высоких температурах. В результате для деформации требуется меньшее усилие.

Механические свойства металлов при повышенных температурах определяют тремя основными методами:

- испытания после длительного воздействия повышенных температур;
- испытания на длительную прочность и ползучесть при повышенных температурах;
- краткосрочные испытания при повышенных температурах.

В рамках данной работы проводили краткосрочные испытания на растяжение при повышенных температурах. Основные методы и образцы аналогичны испытаниям при комнатной температуре, но с применением печи или температурной камеры для исследования поведения материала при более высоких температурах.

Все испытания в рамках данного исследования проводились при установившейся температуре, то есть печь нагревали до заданной температуры и выдерживали образец при этой температуре в течение всего испытания. Нагрузка образца до разрушения производилась с контролем перемещения. Для каждой температуры испытание на растяжение повторяли по меньшей мере два раза.

Графики изменения предела текучести, определённого на продольных образцах из сталей 17Г1С-У, 13ХФА, 09Г2С и стали 20, при повышении температуры испытаний представлены на рис. 14.

На рис. 14 видно, что значения предела текучести у образцов из стали 17Г1С-У и 13ХФА в продольном направлении при повышении температуры от 120 до 250 °С имеют незначительные различия и демонстрируют тенденцию к росту.

Противоположная картина наблюдается у образцов из стали 09Г2С – значения на всем интервале температур имеют незначительные различия и снижаются с повышением температуры.

Образцы из стали 20 не показали строгой зависимости с повышением температуры.

Результаты испытаний образцов из сталей марок 17Г1С-У, 13ХФА и 09Г2С от труб показали плавное снижение временного сопротивления с повышением температуры. Сталь марки 20, напротив, продемонстрировала повышение прочностных свойств в интервале температур от 120 до 250 °С.

На рис. 15 видно, что сталь марки 13ХФА демонстрирует снижение временного сопротивления при повышении температуры на продольных образцах.

На образцах из стали 09Г2С в целом наблюдается тенденция к снижению значений

временного сопротивления с повышением температуры испытания.

Прочностные свойства на образцах из стали марки 20 демонстрируют рост вместе с увеличением температуры испытания.

Относительное удлинение на образцах из всех исследуемых демонстрирует большой разброс значений в интервале температур от 120 до 250 °С, однако тенденция к понижению значений относительного удлинения с

повышением температуры прослеживается (рис. 16).

На рис. 17 видно, что ярко выраженного роста или снижения значений относительного сужения на продольных образцах не наблюдается.

На основании полученных результатов принято решение произвести отбор дополнительных образцов от труб из стали марок 09Г2С и 13ХФА для их термической обработки

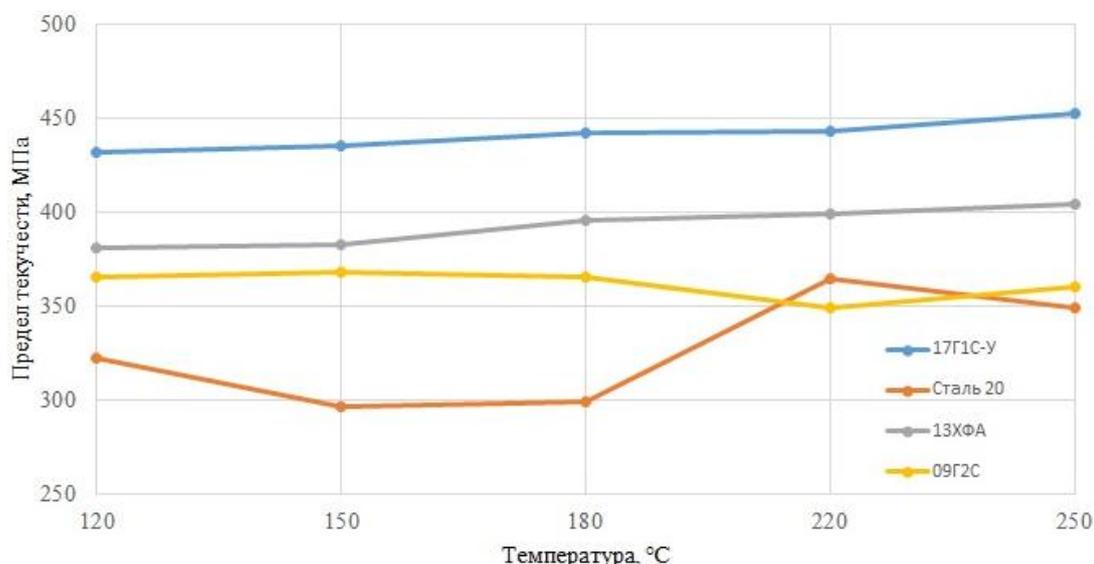


Рис. 14. Зависимость от температуры предела текучести продольных образцов из стали марок 17Г1С-У, 13ХФА, 09Г2С, стали 20  
Fig. 14. Temperature dependence of the yield strength of longitudinal specimens made of steel grades 17G1S-U, 13KhFA, 09G2S, steel 20

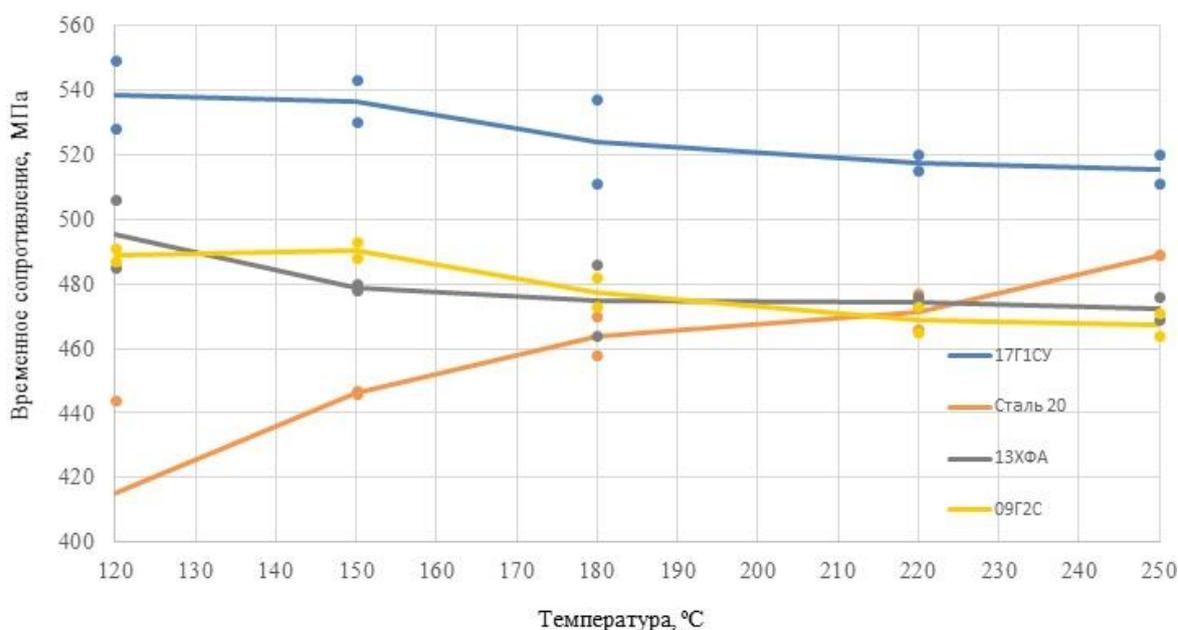


Рис. 15. Зависимость от температуры временного сопротивления на продольных образцах стали марок 20, 17Г1С-У, 13ХФА и 09Г2С  
Fig. 15. Temperature dependence of tensile strength on longitudinal samples of steel grades 20, 17G1S-U, 13KhFA and 09G2S

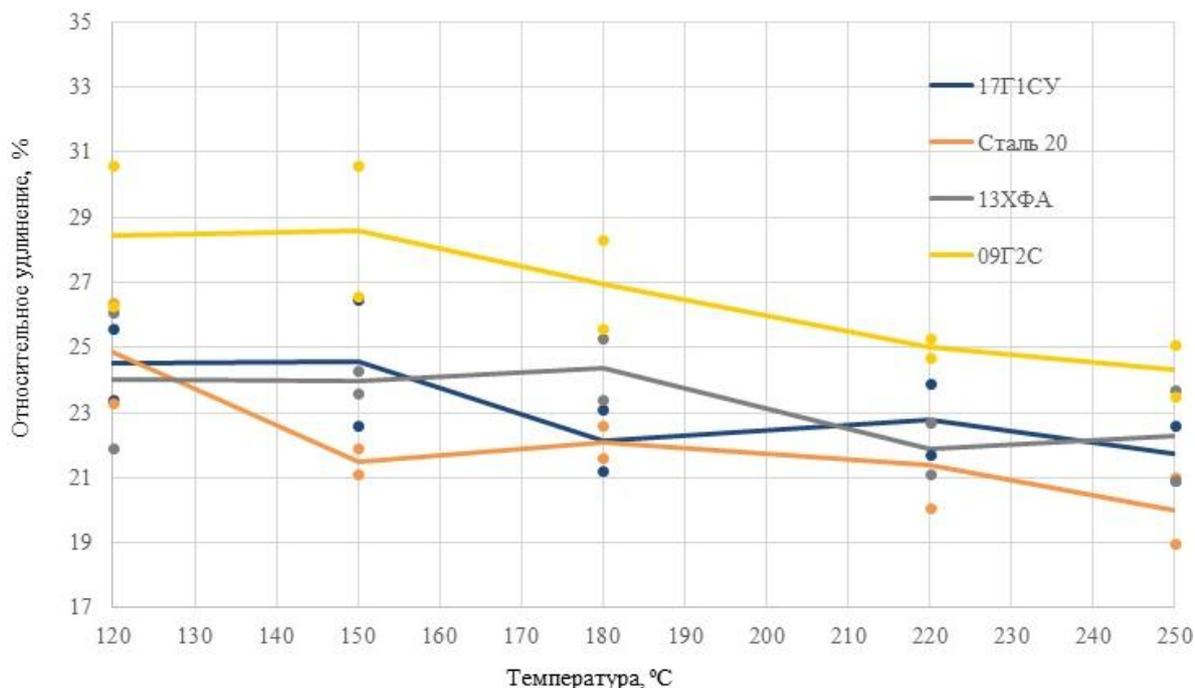


Рис. 16. Зависимость от температуры относительного удлинения на продольных образцах стали марок 20, 17Г1С-У, 13ХФА и 09Г2С

Fig. 16. Temperature dependence of relative elongation on longitudinal samples of steel grades 20, 17G1S-U, 13KhFA and 09G2S

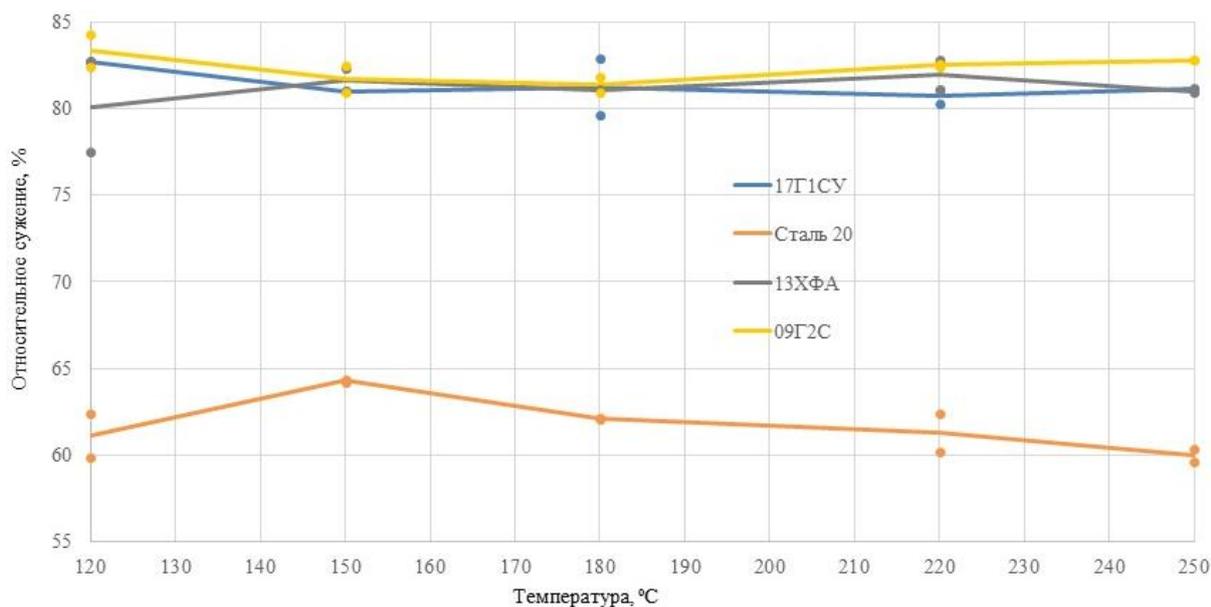


Рис. 17. Зависимость от температуры относительного сужения на продольных образцах стали марок 20, 17Г1С-У, 13ХФА и 09Г2С

Fig. 17. Temperature dependence of the relative contraction on longitudinal samples of steel grades 20, 17G1S-U, 13KhFA and 09G2S

в лабораторных условиях по следующим режимам:

1) марка стали 13ХФА – закалка при температуре 920 °С и последующий отпуск при температуре 620 и 650 °С;

2) марка стали 09Г2С – нормализация.

После ТО проведены испытания на растяжение в исследуемом интервале температур, результаты которых представлены на рис. 18–21.

На рис. 18 видно, что разброс результатов испытаний небольшой, предел текучести

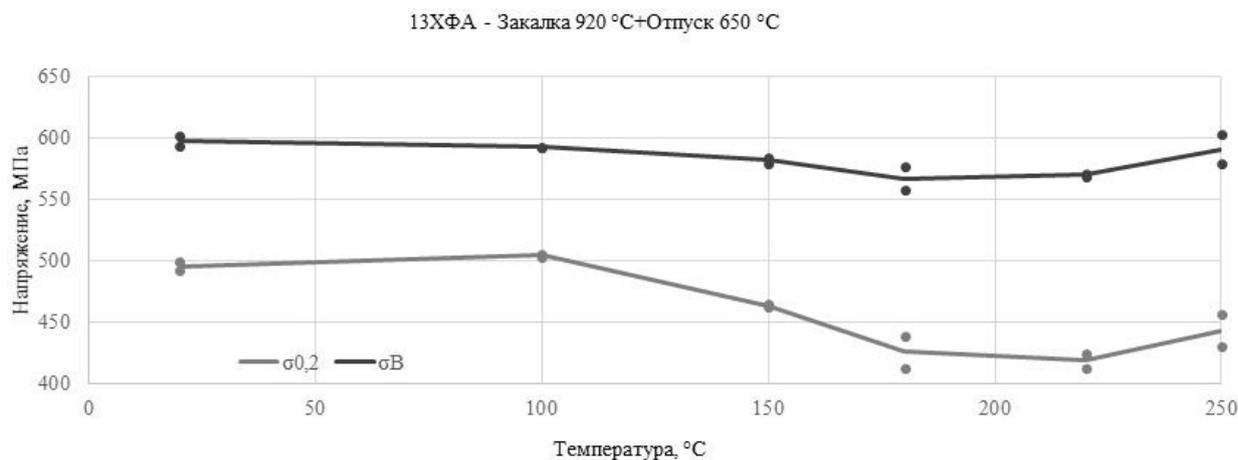


Рис. 18. Зависимость от температуры временного сопротивления и предела текучести повторно термообработанных образцов из стали 13ХФА  
Fig. 18. Temperature dependence of the tensile strength and yield strength of re-heat-treated specimens from steel 13KhFA

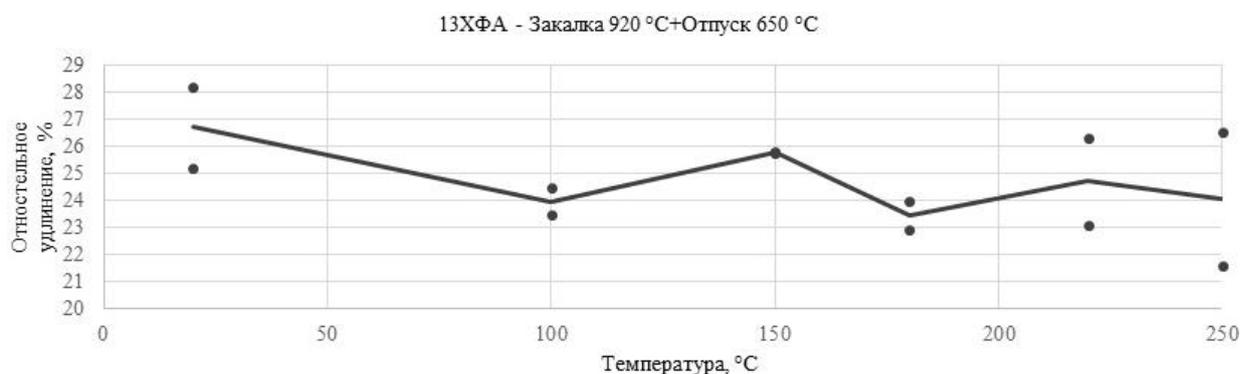


Рис. 19. Зависимость от температуры относительного удлинения повторно термообработанных образцов из стали 13ХФА  
Fig. 19. Temperature dependence of relative elongation of re-heat-treated specimens from steel 13KhFA

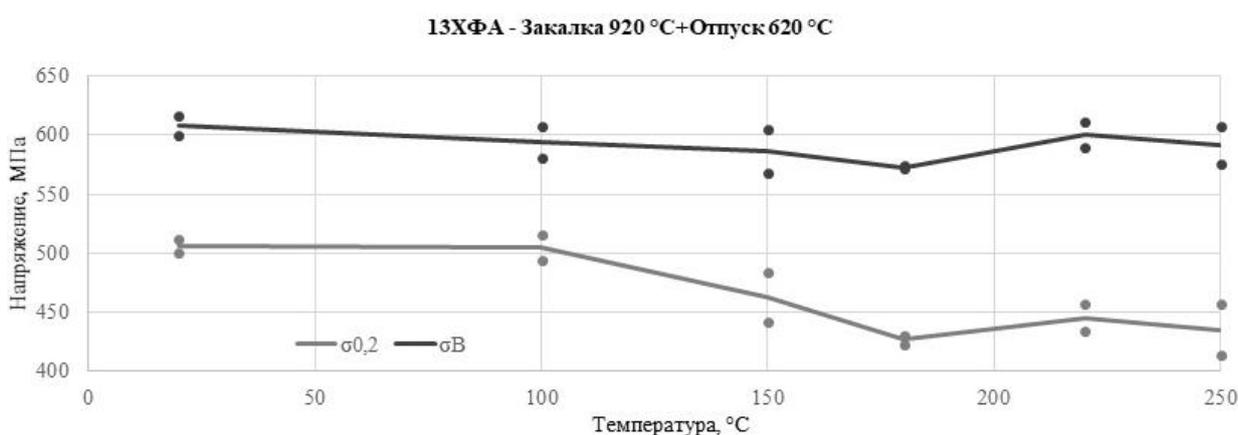


Рис. 20. Зависимость от температуры временного сопротивления и предела текучести повторно термообработанных образцов из стали 13ХФА (З 920+О 620)  
Fig. 20. Temperature dependence of tensile strength and yield strength of re-heat-treated specimens from steel 13KhFA (Z 920 + O 620)

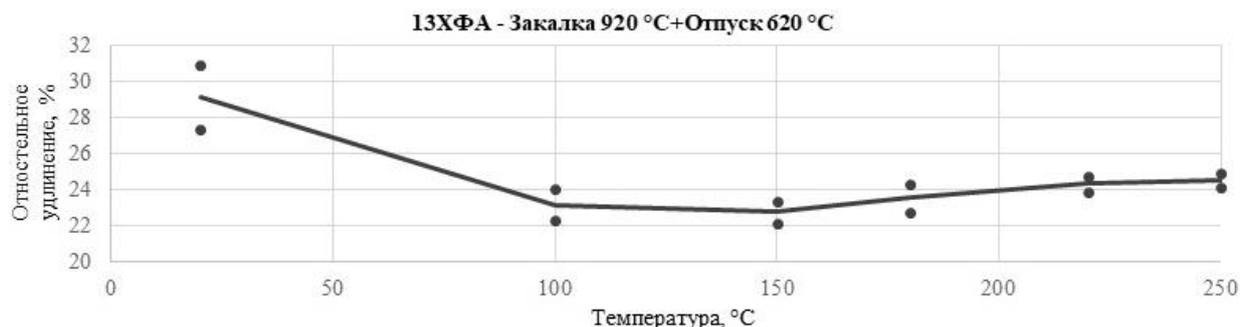


Рис. 21. Зависимость от температуры относительного удлинения повторно термообработанных образцов из стали 13ХФА (З 920 + О 650)

Fig. 21. Temperature dependence of the relative elongation of re-heat-treated samples from steel 13KhFA (Z 920 + O 650)

и временное сопротивление в целом снижаются, однако предел текучести снижается более интенсивно. Относительное удлинение (см. рис. 19) демонстрирует небольшой разброс в интервале температур испытания без явной зависимости от температуры.

На рис. 20 можно отметить несколько больший разброс результатов, чем на предыдущем комплекте образцов. Предел текучести

заметно снижается, временное сопротивление меняется не так существенно. Относительное удлинение (см. рис. 21) демонстрирует заметное снижение при повышении температуры испытания относительно комнатной, однако далее значение практически не меняется.

На рис. 22 можно отметить отсутствие заметного разброса результатов. Предел текучести явно снижается при повышении темпе-

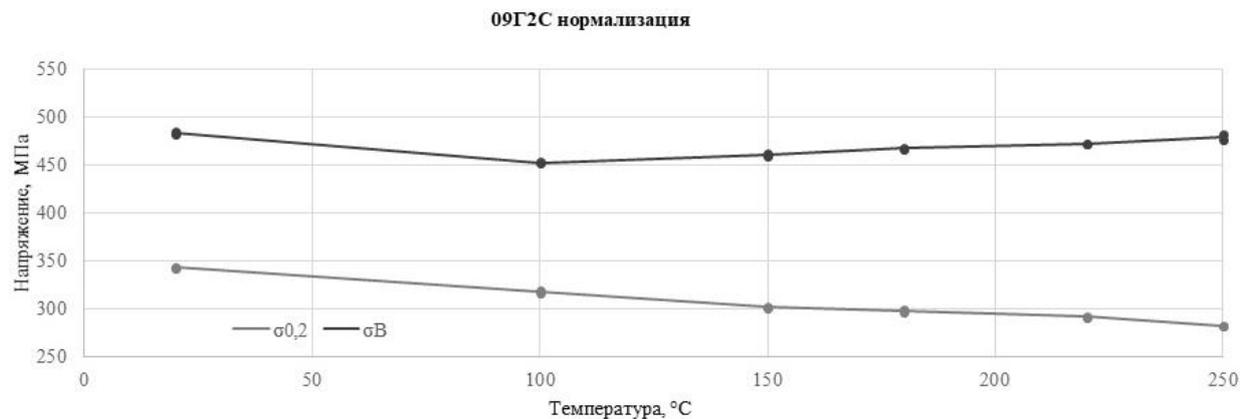


Рис. 22. Зависимость от температуры временного сопротивления и предела текучести повторно термообработанных образцов из стали 09Г2С (нормализация)

Fig. 22. Dependence on temperature of tensile strength and yield strength of re-heat-treated samples from steel 09G2S (normalization)

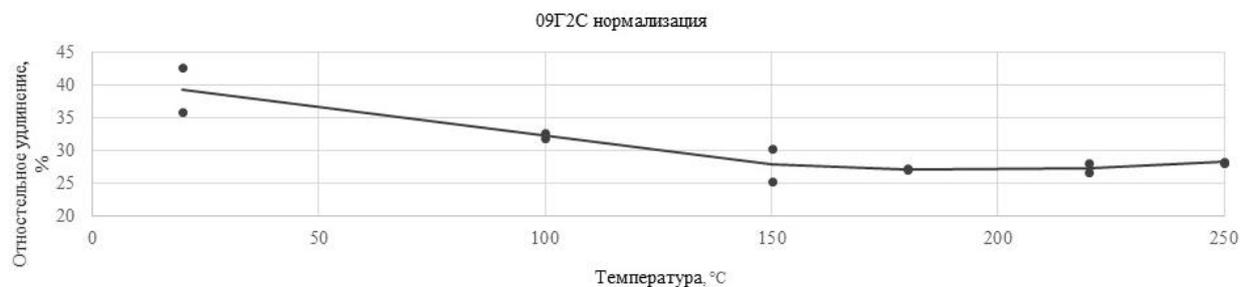


Рис. 23. Зависимость от температуры относительного удлинения повторно термообработанных образцов из стали 09Г2С (нормализация)

Fig. 23. Temperature dependence of relative elongation of re-heat-treated specimens from steel 09G2S (normalization)

ратуры испытаний, временное сопротивление снижается до температуры 100 °С, а затем наблюдается устойчивый рост при повышении температуры. Данное поведение вероятно может быть связано с проявлением эффекта динамического деформационного старения стали в интервале температур от 200 до 300 °С, которое возникает в процессе испытания [7]. Данный эффект проявляется в аномальном повышении прочности и потере пластичности в некотором интервале температур, который также зависит от скорости деформации и плотности дислокаций в стали. Относительное удлинение (рис. 23) демонстрирует заметное снижение значений при повышении температуры испытаний.

### Оценка изменения механических свойств металла труб в интервале температур эксплуатации

подавляющее большинство широко применяемых конструкционных металлов имеют ОЦК (углеродистая сталь, тугоплавкие металлы и др.) или ГЦК (медь, алюминий и др.) кристаллическую решетку. Прочностные характеристики металлов с ГЦК-решеткой практически не зависят от температуры, в то время как свойства металлов с ОЦК-решеткой зачастую демонстрируют сильную зависимость от температуры. Такое поведение связано с характером движения дислокаций в каждом типе кристаллической решетки. Атомы в металлах с ГЦК-решеткой «упакованы» более близко друг к другу по сравнению с ОЦК. Например, из-за резкого снижения подвижности дислокаций в металлах с ОЦК-решеткой происходит интенсивный рост предела текучести и почти полная потеря пластичности при низких температурах, что и приводит к смене механизма разрушения с вязкого на хрупкий [8].

Принимая во внимание тот факт, что для сталей соблюдается принцип линейной аддитивности механизмов упрочнения, согласно результатам работы [9] для предела текучести можно записать следующее соотношение:

$$\sigma_T = \sigma_0 + \Delta\sigma_{т.р} + \Delta\sigma_d + \Delta\sigma_{д.у} + \Delta\sigma_3, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  – напряжение трения решетки;

$\Delta\sigma_{т.р}$  – твердорастворное упрочнение;

$\Delta\sigma_d$  – дислокационное упрочнение;

$\Delta\sigma_{д.у}$  – дисперсионное упрочнение;

$\Delta\sigma_3$  – зернограничное упрочнение.

Сопротивление движению дислокаций от растворённых атомов легирующих элементов, дисперсных выделений, дислокаций «леса» и границ зёрен имеет атермическую природу, т. е. слабо зависит от снижения температуры. Изменяется при снижении температуры только напряжение трения решетки, для которого температурная зависимость выражается следующим эмпирическим соотношением:

$$\sigma_0 = A + B e^{-CT}, \quad (2)$$

где  $A, B$  и  $C$  – константы;

$T$  – температура, °С.

Таким образом, предел текучести должен повышаться при уменьшении температуры по экспоненциальной зависимости.

Формулы, описывающие температурные изменения прочностных свойств металлов, содержатся в различных международных стандартах, а также в публикациях отечественных и зарубежных авторов. Однако в открытых источниках отсутствуют результаты комплексных исследований механических характеристик в широком диапазоне температур для одинаковых материалов. Отдельные результаты представлены для пониженных [10, 11] и повышенных [12, 13] температур испытания. Кроме того, стандартизованы расчеты снижения прочностных характеристик при проектировании стальных конструкций в условиях экстремального нагрева при пожаре [14–16].

Имея собственный набор данных, полученных при испытаниях трубной продукции различных производителей с различными химическими составами, уровнями прочности и состояниями поставки, в ходе выполнения работ по данному договору целесообразно получить собственные расчётные формулы для рассматриваемых марок сталей в интервале температур от –80 до 250 °С.

Независимо от марки стали влияние температуры испытания в указанном диапазоне на временное сопротивление, определённое при испытаниях на статическое растяжение, может быть с достаточной точностью описано следующей экспоненциальной зависимостью с привязкой к результату, полученному при испытании образцов при комнатной температуре:

$$\sigma_{YT} = \sigma_{Y(+20^\circ\text{C})} \times \left( \frac{120}{\sigma_{Y(+20^\circ\text{C})}} \left( \exp\left(-\frac{T}{170}\right) - 0,9 \right) + 1 \right), \quad (3)$$

где  $\sigma_{Y(+20^{\circ}\text{C})}$  – величина временного сопротивления при температуре испытания  $20^{\circ}\text{C}$ ;  
 $T$  – температура испытания,  $^{\circ}\text{C}$ .

Сравнивая фактические данные, полученные при испытании, и расчетные, можно сделать вывод, что за исключением температуры испытаний  $-80^{\circ}\text{C}$  наблюдается достаточно хорошая сходимость (разница не более 5 %) расчётных и экспериментальных значений временного сопротивления во всем интервале температур испытания.

Подобную зависимость можно предложить и для оценки изменения предела текучести:

$$\sigma_{0,2T} = \sigma_{0,2(+20^{\circ}\text{C})} \times \left( \frac{55}{\sigma_{0,2(+20^{\circ}\text{C})}} \left( \exp\left(-\frac{T}{170}\right) - 0,9 \right) + 1 \right), \quad (4)$$

где  $\sigma_{0,2(+20^{\circ}\text{C})}$  – величина предела текучести при температуре испытания  $20^{\circ}\text{C}$ ;  
 $T$  – температура испытания,  $^{\circ}\text{C}$ .

По пределу текучести неплохую сходимость продемонстрировали образцы из стали марок 13ХФА и 09Г2С. Остальные образцы показали аномальный разброс результатов (сталь 20), а также рост предела текучести как с повышением, так и с понижением температуры. Однако на примере стали марок 13ХФА и 09Г2С, которые были подвергнуты повторной термообработке в лабораторных условиях, можно сделать вывод о том, что такое поведение вероятнее всего обусловлено существенной неравномерностью свойств по периметру трубы.

### Заключение

Проведены испытания и исследования прочностных свойств при повышенных (до  $250^{\circ}\text{C}$ ) и пониженных (до  $-80^{\circ}\text{C}$ ) температурах и вязкопластических свойств при пониженных температурах (до  $-100^{\circ}\text{C}$ ), испытания цилиндрических образцов на статическое растяжение и образцов Шарпи на ударный изгиб соответственно, массово применяемых марок сталей – сталь 20, 09Г2С, 13ХФА, 17Г1С-У.

При понижении температуры испытания на всех сталях прослеживается тенденция к повышению временного сопротивления и предела текучести. Относительное удлинение и сужение практически не меняются во всем интервале температур испытаний, однако удлинение демонстрирует несколько больший разброс значений даже в пределах комплекта

образцов, испытанных при одной температуре. Такое поведение характерно для подавляющего большинства металлических материалов. Тем не менее это не означает, что стали можно применять при более высоких допускаемых напряжениях, так как чаще всего трубопроводы эксплуатируются в довольно широком диапазоне температур, а также при понижении температуры на первый план выступает сопротивляемость хрупким разрушениям или вязкость. Стали, эксплуатация которых предполагается при пониженных температурах, должны иметь по возможности мелкое зерно. Лучшие показатели вязкости демонстрируют низколегированные и термически обработанные стали.

Анализ зависимости прочностных характеристик от температуры проводили на образцах от труб, имеющих разный химический состав, уровень прочности, толщину стенки, состояние поставки (горячекатаные, нормализованные, закаленные и отпущенные по различным режимам) и, соответственно, различную микроструктуру. По результатам исследования можно сделать вывод о том, что в исследуемом диапазоне температур все выбранные стали демонстрируют общую тенденцию к изменению прочностных характеристик, которые могут быть с достаточной точностью представлены в виде экспоненциальных зависимостей. Отклонения рассчитанных значений относительно среднего по результатам испытаний для каждой температуры в случае временного сопротивления в среднем не превышают 5 % для всех исследуемых марок стали, а в случае условного предела текучести в некоторых случаях отклонение составляет 15–20 %. Такую точность можно считать приемлемой, так как по результатам испытаний комплектов образцов для каждой температуры отклонение от среднего значения результатов каждого образца при каждой температуре в случае временного сопротивления составляет 5 %, а в случае непрерывной кривой упрочнения и, соответственно, определения условного предела текучести разброс чуть более существенный и в ряде случаев достигает 10 %.

Отклонения от предлагаемых температурных зависимостей можно разделить на несколько групп по предполагаемым причинам их возникновения.

1. Прослеживается общая тенденция по всем испытанным образцам к снижению как

временного сопротивления, так и предела текучести при  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Данный факт можно объяснить сменой способа охлаждения при переходе к данной температуре.

2. Большая часть испытанных сталей демонстрирует аномальное отклонение как временного сопротивления, так и условного предела текучести в интервале температур от  $220$  до  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Можно предположить, что это связано с динамически деформационным старением [8], которое возникает непосредственно в процессе испытания при стандартных скоростях деформации ( $5 \cdot 10^{-4} \dots 3 \cdot 10^{-3}\text{ с}^{-1}$ ) в данном интервале температур. Однако так как исследование данного явления не планировалось в рамках настоящей работы, требуется в рамках будущих работ обратить внимание на эту закономерность. Кроме того, по извест-

ным литературным данным указанное явление скорее приводит к росту временного сопротивления, а не предела текучести.

3. Наиболее вероятной причиной отклонений фактических значений от логичных зависимостей непрерывного снижения предела текучести при повышении температуры испытания является неравномерность механических характеристик (и микроструктуры) по длине и периметру трубы, которые могут быть вызваны неравномерностью изменения температурного поля при термической обработке. Особенно заметен разброс на более толстых стенках и при упрочнении закалкой. Характерно, что наилучшую повторяемость результатов и строгую зависимость предела текучести от температуры испытания обеспечила нормализация образцов в лабораторных условиях.

#### Список литературы

1. ASM Specialty Handbook. Heat-Resistant Materials / J.R. Davis (ed.). ASM International, 1997.
2. ГОСТ 32569–2013. Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производствах. М.: Стандартинформ, 2015.
3. Oldfield W. Fitting Curves to Toughness Data // Journal of Testing and Evaluation. 1979. Vol. 7, iss. 6. P. 326–333. DOI: 10.1520/JTE11508J
4. New standardized method for determining the brittle-ductile transition temperature / I. Steller, N. Blaes, B. Kocdemir, J. Brandenburger // Stahl und Eisen: Zeitschrift für die Herstellung und Verarbeitung von Eisen und Stahl. 2011. Vol. 131, no. 2. P. 55–58.
5. Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. Деформационное старение стали. М.: Metallurgia, 1972. 320 с.
6. Штремель М.А. Информативность измерений ударной вязкости // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka. 2008. № 11 (641). P. 37–51.
7. Bressanelli J.P., Moskowicz A. Effects of strain rate, temperature, and composition on tensile properties of metastable austenitic stainless steels // Transactions of the ASM. 1966. Vol. 59. P. 223–239.
8. Павлов В.А. Физические основы холодной деформации ОЦК металлов. М.: Наука, 1978. 208 с.
9. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. Metallofizika vysokopronchnykh spлавov. М.: Metallurgia, 1986. 312 с.
10. ISO 15653:2018 Metallic materials – Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds. 2018. 46 p.
11. Филин В.Ю. Разработка критериев трещиностойкости и хладостойкости материалов сварных конструкций морского шельфа на основе механики разрушения: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2019.
12. DNV GL-ST-F101 Submarine Pipeline Systems. 2017. 372 p.
13. ASME B31.8 Gas transmission and Distribution Piping Systems.
14. CEN, Eurocode 3: design of steel structures, part 1–2, Structural fire design, European Committee for Standardization, document BS EN 1993-1-2, 2005.
15. Standards Australia, AS4100: Steel Structures. SA, Sydney, 1990.
16. CECS 200:2006, Technical code for fire safety of steel structure in building. 2006.

### References

1. Davis J.R. (ed.). *ASM Specialty Handbook. Heat-Resistant Materials*. ASM International; 1997.
2. *GOST 32569–2013*. [Industrial steel pipe-lines. Requirements for design and operation in explosive and chemically dangerous industries]. Moscow: Standartinform Publ.; 2015. (In Russ.)
3. Oldfield W. Fitting Curves to Toughness Data. *Journal of Testing and Evaluation*. 1979;7(6):326–333. DOI: 10.1520/JTE11508J
4. Steller I., Blaes N., Kocdemir B., Brandenburger J. New standardized method for determining the brittle-ductile transition temperature. *Stahl und Eisen: Zeitschrift für die Herstellung und Verarbeitung von Eisen und Stahl*. 2011;131(2):55–58.
5. Babich V.K., Gul' Yu.P., Dolzhenkov I.E. *Deformatsionnoye stareniye stali* [Deformation aging of steel]. Moscow: Metallurgiya; 1972. 320 p. (In Russ.)
6. Shtremel' M.A. Information capacity of impact toughness measurements. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal science and heat treatment*. 2008;11(641):37–51. (In Russ.)
7. Bressanelli J.P., Moskowitz A. Effects of strain rate, temperature, and composition on tensile properties of metastable austenitic stainless steels. *Transactions of the ASM*. 1966;59:223–239.
8. Pavlov V.A. *Fizicheskiye osnovy kholodnoy deformatsii OTsK metallov* [Physical bases of cold deformation of VCCl metals]. Moscow: Nauka; 1978. 208 p. (In Russ.)
9. Gol'dshteyn M.I., Litvinov V.S., Bronfin B.M. *Metallofizika vysokoprochnykh splavov* [Metallophysics of high-strength alloys]. Moscow: Metallurgiya; 1986. 312 p. (In Russ.)
10. ISO 15653:2018 Metallic materials – Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds; 2018. 46 p.
11. Filin V.Yu. *Razrabotka kriteriyev treshchinostoykosti i khladostoykosti materialov svarnykh konstruksiy morskogo shel'fa na osnove mekhaniki razrusheniya: dis. d-ra tekhn. nauk* [Development of criteria for crack resistance and cold resistance of materials of welded structures of the offshore shelf based on fracture mechanics. Doct. sci. diss.]. St. Petersburg; 2019. (In Russ.)
12. DNV GL-ST-F101 Submarine Pipeline Systems; 2017. 372 p.
13. ASME B31.8 Gas transmission and Distribution Piping Systems.
14. CEN, Eurocode 3: design of steel structures, part 1–2, Structural fire design, European Committee for Standardization, document BS EN 1993-1-2; 2005.
15. Standards Australia, AS4100: Steel Structures. SA, Sydney; 1990.
16. CECS 200:2006, Technical code for fire safety of steel structure in building; 2006

### Информация об авторах

**Яковлев Дмитрий Сергеевич**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией прочности и сварки труб, АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия; Yakovlev@rosniti.ru.

**Микуров Виталий Валерьевич**, начальник участка механических испытаний, АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия; Mikurov@rosniti.ru.

**Машенцева Мария Сергеевна**, старший инженер лаборатории прочности и сварки труб, АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия; Mashentseva@rosniti.ru.

### Information about the authors

**Dmitriy S. Yakovlev**, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory of Strength and Pipe Welding, The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia; Yakovlev@rosniti.ru.

**Vitaliy V. Mikurov**, Head of Section Mechanical Test Section, The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia; Mikurov@rosniti.ru.

**Maria S. Mashentseva**, Senior Engineer of the Pipe strength and Welding Laboratory, The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia; Mashentseva@rosniti.ru.

*Статья поступила в редакцию 09.03.2022*

*The article was submitted 09.03.2022*