



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Влияние степени деформации в условиях низких температур на превращения и свойства метастабильных аустенитных сталей

Светлана Вологжанина^{1, a, *}, Алексей Иголкин^{2, b}, Алексей Перегудов^{3, c}, Игорь Баранов^{2, d},
 Никита Мартюшев^{4, e}

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Васильевский остров, 21 линия, 2, Санкт-Петербург, 199106, Россия

² Университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия

³ ГУП «Петербургский метрополитен», Московский пр., 28, Санкт-Петербург, 190013, Россия

⁴ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0001-7675-865X>,  svet_spb@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-8287-1851>,  igolkin47@mail.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-1273-0743>,  mikki435@gmail.com, ^d  <https://orcid.org/0000-0003-0595-368X>,  ivbaranov@itmo.ru,

^e  <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>,  martjushev@tpu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669.1.017

История статьи:

Поступила: 30 декабря 2021

Рецензирование: 21 января 2022

Принята к печати: 15 февраля 2022

Доступно онлайн: 15 марта 2022

Ключевые слова:

Метастабильная аустенитная сталь

Низкие температуры

Фазово-структурные превращения

Скорость деформации

Мартенсит охлаждения

Механические свойства

АННОТАЦИЯ

Введение. Для надежной работы низкотемпературного оборудования необходимо применение материалов, способных обеспечить работоспособность в широком температурном интервале в условиях знакопеременных нагрузок, воздействия коррозионных сред и т.п. Чаще всего в таких случаях применяют метастабильные аустенитные стали (МАС) различных систем легирования. К настоящему времени мало данных о поведении таких материалов в условиях низких температур, включая фазово-структурные превращения, особенности таких превращений в разных температурных зонах, в том числе при приложении нагрузки как статической, так и динамической. **Предметом исследования** в данной работе выбраны МАС марок 10X14AG20 и 10X14G14N4T. **Цель работы** – оценить работоспособность промышленно применяемых МАС для возможного их применения взамен стали 12X18H10T. **Методика исследований.** Фазовый состав образцов исследовали на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3.0. Механические испытания проводили в интервале температур от +20 до –196 °С. Испытания на статическое одноосное растяжение проводили по ГОСТ 11150–75, испытания на динамический изгиб – по ГОСТ 9454–78. **Результаты работы.** На основании полученных данных установлено, что повышение скорости деформации при низких температурах способствует снижению количества мартенситных фаз в исследуемых сталях. Выявлено, что способность к упрочнению при упругопластическом деформировании уменьшается и исчезает при температуре перехода материала в хрупкое состояние. Показано, что увеличение скорости низкотемпературной деформации образцов препятствует развитию в сталях фазовых мартенситных превращений. **Область применения.** Полученные результаты могут быть рекомендованы к применению при выборе материалов для изготовления оборудования, эксплуатируемого при температурах до –196 °С. **Выводы.** Показано, что полученные значения характеристик механических свойств позволяют рекомендовать исследованные МАС в качестве заменителя стали 12X18H10T вплоть до температуры –196 °С.

Для цитирования: Влияние степени деформации в условиях низких температур на превращения и свойства метастабильных аустенитных сталей / С.А. Вологжанина, А.Ф. Иголкин, А.А. Перегудов, И.В. Баранов, Н.В. Мартюшев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 73–86. – DOI:10.17212/1994-6309-2022-24.1-73-86.

Введение

Низкотемпературная техника широко применяется в самых различных отраслях промышленности: металлургия, химия, ракетостроение,

энергетика и многих других. В последние годы активно развиваются такие отрасли, как криобиология, криомедицина, криоэнергетика, в которых необходимо использовать оборудование, способное обеспечивать работоспособность до температур, близких к абсолютному нулю [1–9].

Для такого оборудования необходимо использовать материалы, способствующие работоспособности в условиях низких температур. К ним предъявляют особые требования по со-

*Адрес для переписки

Вологжанина Светлана Антониновна, д.т.н., профессор
 Санкт-Петербургский горный университет,
 Васильевский остров, 21 линия, 2,
 199106, Санкт-Петербург, Россия
 Тел.: +79213491682, e-mail: svet_spb@mail.ru

четанию характеристик прочности, вязкости и пластичности, коррозионной стойкости, устойчивости к разрушению при резких изменениях температуры и скоростях приложения нагрузки [1–4]. Кроме того, следует учитывать особенности изготовления оборудования: в ряде случаев необходимо изготовление деталей литьем, достаточно часто применяется обработка материалов давлением, важно учитывать применение сварочных технологий в процессе сборки [4]. Чаще всего для изготовления низкотемпературного оборудования применяют метастабильные аустенитные стали различных систем легирования. Несмотря на достаточный опыт применения таких материалов, к настоящему времени не накоплена база данных об их поведении в условиях низких температур, включая фазово-структурные превращения, особенности таких превращений в разных температурных зонах, в том числе при приложении нагрузки как статической, так и динамической. Недостаточно информации о влиянии концентраторов напряжений, которые всегда возникают в деталях оборудования на разных этапах его изготовления, на изменения физико-механических свойств метастабильных аустенитных сталей [1–3, 5–20].

Для заключения о возможности использования материалов при низких, а также криогенных температурах необходимо проведение исследований по оценке изменения структуры и комплекса свойств сталей в ходе охлаждения, в том числе при резких перепадах температур, например, в процессе заполнения емкостей жидким криопродуктом. Анализ структуры и свойств материалов после длительной эксплуатации низкотемпературного оборудования позволил сделать заключение, что традиционно применяемый комплекс исследований для выбора материала, как правило, является недостаточным и не может гарантировать надежную эксплуатацию установок. Это связано с тем, что многочисленные технологические разогревы в ходе длительной эксплуатации могут приводить к изменениям фазово-структурного состава. Это, в свою очередь, может стать причиной нештатных ситуаций и приводить к преждевременным разрушениям низкотемпературного оборудования, например емкостей и трубопроводов [5, 21–24].

В связи с этим важным является вопрос получения информации об изменении фазо-

во-структурного состояния и механических характеристик, традиционно применяемых в низкотемпературной технике метастабильных аустенитных сталей. Накопленные сведения по поведению материалов позволят дать уточнения по рекомендациям при выборе материала для низкотемпературного, в том числе криогенного оборудования, а также его надежности в ходе длительной эксплуатации.

Цель исследования – оценить работоспособность промышленно применяемых метастабильных аустенитных сталей (далее МАС) для возможного их применения взамен стали 12X18H10T.

Задачи исследования:

- оценить совместное влияние низких температур и деформаций на процессы фазово-структурных превращений в метастабильных аустенитных сталях различных систем легирования;
- исследовать влияние способа изготовления (литое или деформированное состояние), наличия концентраторов напряжений, скорости приложения нагрузки и изменения температур на комплекс свойств аустенитных сталей;
- дать заключение о возможности замены традиционно применяемой стали 12X18H10T для изготовления оборудования низкотемпературной, в том числе криогенной техники.

Методика исследований

В качестве объектов исследования были выбраны традиционно применяемые метастабильные аустенитные стали Cr-Ni-Mn и Cr-N-Mn систем легирования. Химический состав промышленных плавок исследуемых сталей приведен в таблице. Состав определяли рентгеноспектральным методом.

Стали выплавляли в индукционной сталеплавильной. Полученные слитки проковывали на заготовки сечением 30×40 мм и диаметром 20 мм. Температуруковки выбрали 1000...1250 °С. Полученные заготовки подвергали термической обработке, состоящей из аустенитизации для стали 10X14AГ20 при температуре 900...950 °С и 1000...1050 °С – для стали 10X14Г14Н4Т, охлаждение осуществляли в воде.

На рентгеновском дифрактометре ДРОН-3.0 исследовали фазовый состав образцов. Механические испытания проводили в интервале темпе-

Химический состав сталей 10X14AG20, 10X14Г14Н4Т
Chemical composition of steels 10Cr14NMn20, 10Cr14Mn14Ni4Ti

Марка стали / Steel grade	Химический элемент, масс. % / Chemical element, wt. %									
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Ti	Cu
10X14AG20 / 10Cr14NMn20	0,10	0,5	20,3	–	0,011	0,012	14,8	0,3	0,45	–
10X14Г14Н4Т / 10Cr14Mn14Ni4Ti	0,10	0,7	14,9	–	0,019	0,020	14,6	–	0,23	–

ратур от +20 до –196 °С. На разрывной машине Р-20 образцы сталей испытывали на статическое одноосное растяжение, для чего применяли цилиндрические образцы с резьбовыми головками по ГОСТ 11150–84 «Металлы. Методы испытания на растяжение при пониженных температурах», а также образцы с кольцевым надрезом. На маятниковом копре проводились испытания на динамический изгиб с применением образцов по ГОСТ 9454–78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах».

Результаты и их обсуждение

Известно, что в метастабильных аустенитных сталях возможно протекание фазовых превращений в процессе изготовления изделий с применениемковки, штамповки и других видов воздействия, а также в ходе эксплуатации в условиях динамического нагружения при низких температурах. С учетом степени ответственности низкотемпературного оборудования был проведен комплекс исследований для определения зависимости мартенситных превращений в промышленно применяемых метастабильных аустенитных сталях 10X14AG20 и 10X14Г14Н4Т от скорости деформации и температуры испытания.

В процессе проведения оценки фазовых превращений, происходящих под воздействием низких температур и деформаций в стали 10X14AG20 при разных скоростях деформирования, было выявлено следующее. При деформации стали 10X14AG20 при 20 °С со скоростью $\dot{\epsilon} = 0,34 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ ϵ -мартенсит образуется сразу же. В то же время увеличение скорости до $\dot{\epsilon} = 0,34 \cdot 10^{-1} \text{ c}^{-1}$ вызывает образование ϵ -мартенсита только после деформации на 25 %, а при скорости, равной $\dot{\epsilon} = 0,34 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$, твердый рас-

твор остается стабильным вплоть до разрушения образцов (рис. 1).

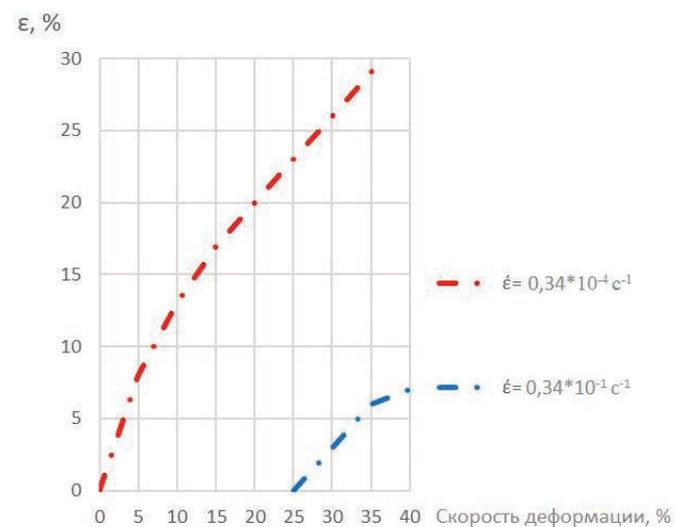


Рис. 1. Зависимость мартенситных превращений в стали 10X14AG20 от скорости деформации при температуре испытания 20 °С

Fig. 1. Dependence of martensitic transformations in steel 10Cr14NMn20 on the strain rate at a test temperature of 20 °С

Понижение температуры испытания до –100 °С и далее до –196 °С сопровождается появлением α -мартенсита. Характерно, что при –100 °С α -мартенсит появляется после 10...15 % деформации, а его количество увеличивается при дальнейшей деформации. Количество ϵ -мартенсита в этих условиях сначала увеличивается, а затем уменьшается (рис. 2). Это может свидетельствовать о том, что фазовые превращения идут в последовательности $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$. Характерным является также то, что увеличение скорости в 10^3 раз уменьшает степень распада γ -твердого раствора.

Мартенситные превращения γ -твердого раствора при –196 °С и тех же скоростях происхо-

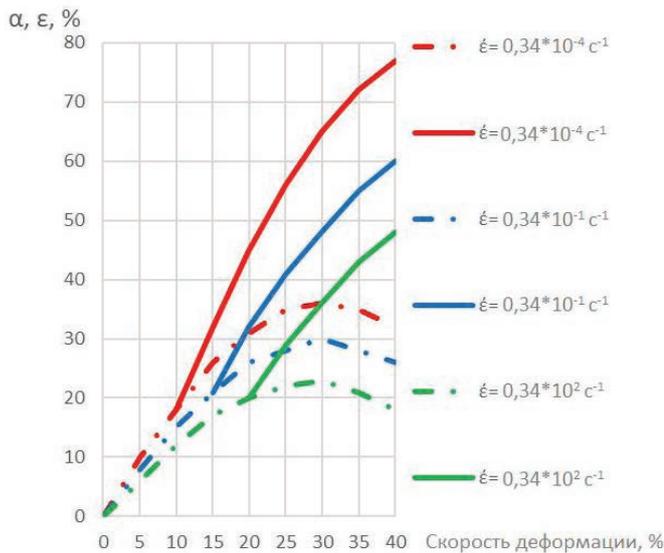


Рис. 2. Зависимость мартенситных превращений в стали 10X14AГ20 от скорости деформации при температуре испытания $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Fig. 2. Dependence of martensitic transformations in steel 10Cr14NMn20 on the strain rate at a test temperature of $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$

дят аналогично, как при $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, за исключением того, что наблюдается совместное появление ϵ - и α -мартенсита (рис. 3).

Таким образом, установлено, что увеличение скорости деформации снижает степень превра-

щения аустенита в мартенсит и не влияет на его кинетику.

При проведении оценки фазовых превращений, происходящих под воздействием низких температур и деформаций в стали 10X14Г14Н4Т при разных скоростях деформирования, было выявлено следующее.

В результате охлаждения ниже $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ появляются две мартенситные фазы α - и ϵ -мартенсит охлаждения. По мере снижения температуры количество этих фаз увеличивается, однако не превышает 12 % для ϵ -мартенсита и 8 % – для α -мартенсита (рис. 4).

При низкотемпературной деформации стали 10X14Г14Н4Т по мере понижения температуры количество аустенита и ϵ -мартенсита уменьшается, а α -мартенсита увеличивается. Следует отметить, что в температурном интервале деформации от 20 до $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ интенсивность образования α -мартенсита невелика и, по-видимому, в этом температурном диапазоне превращение происходит по схеме $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$, а при дальнейшем понижении температуры количество α -фазы резко возрастает. С повышением скорости деформации уменьшается превращение аустенита в мартенсит (рис. 5).

Показано, что уменьшение количества вторичных структурных α - и ϵ -фаз с увеличением

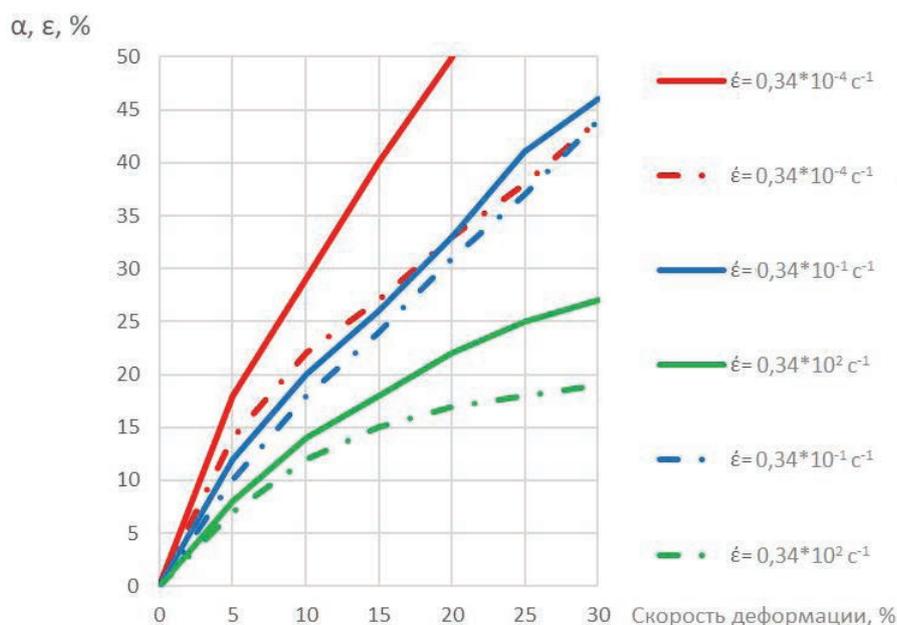


Рис. 3. Зависимость мартенситных превращений в стали 10X14AГ20 от скорости деформации при температуре испытания $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Fig. 3. Dependence of martensitic transformations in steel 10Cr14NMn20 on the strain rate at a test temperature of $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$

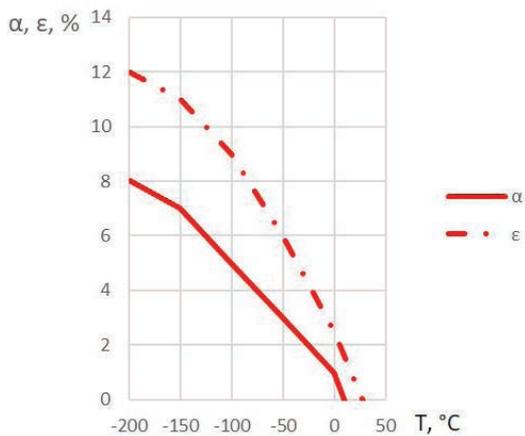


Рис. 4. Зависимость мартенситных превращений в стали 10X14AG20 от температуры испытания

Fig. 4. Dependence of martensitic transformations in steel 10Cr14Mn14Ti on test temperature

скорости деформации метастабильных аустенитных сталей может быть связано с разогревом образцов.

Авторами [4, 13–17] было показано, что высокоскоростная деформация приводит к резкому повышению температуры на плоскостях сдвига. Области высокотемпературного разогрева, как правило, группируются в тонких слоях сдвига, в результате чего соседние зоны нагреваются медленно. Из этого следует, что снижение количества мартенситных фаз, связанное с увеличением скорости деформации, можно объяснить увеличением температуры образцов за счет теплоты, выделяющейся в процессе деформации. В то же время повышение доли α -фазы при увеличении скорости деформации может быть связано с тем, что растяжение образцов производили в изотермических условиях. Таким образом, при изотермическом растяжении увеличение скорости деформации приводит к повышению доли образующегося α -мартенсита, а при возникающем нагреве образца препятствует образованию вторичных структурных фаз.

В данной работе проведена оценка влияния низких температур и концентраторов напряжений на величину значений временного сопротивления исследуемых сталей в деформированном и литом состоянии. Установлено, что с понижением температуры величина временного сопротивления повышается. Концентрация

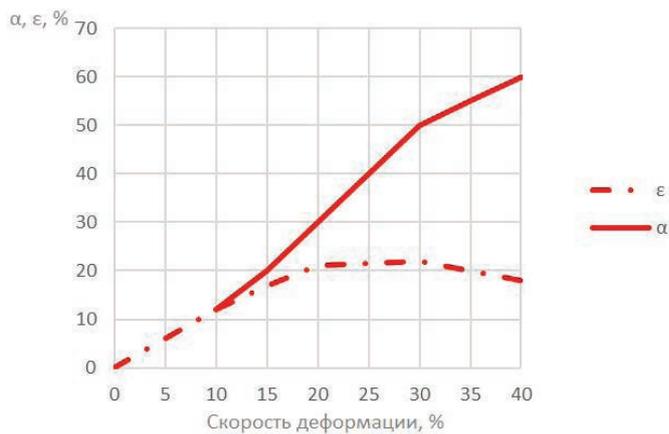


Рис. 5. Зависимость мартенситных превращений в стали 10X14Г14Н4Т от скорости деформации при температуре испытания $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 5. Dependence of martensitic transformations in steel 10Cr14Mn14Ni4Ti on the strain rate at a test temperature of $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$

напряжений, вызванная кольцевым надрезом, привела к более существенному повышению характеристик временного сопротивления, особенно при снижении температуры. Необходимо отметить, что исследуемые стали выгодно отличаются от традиционно применяемой 12X18N10T [4] более высоким уровнем временного сопротивления во всем температурном диапазоне. Кроме того, сравнение свойств литого и деформированного состояния показало, что в деформированном состоянии обе стали имеют более высокие значения временного сопротивления (рис. 6).

В настоящей работе проведена оценка влияния низких температур и концентраторов напряжений на величину значений предела текучести исследуемых сталей в деформированном и литом состоянии. Из проведенных исследований видно, что с понижением температуры величина временного сопротивления повышается. Концентрация напряжений, вызванная кольцевым надрезом, привела к более существенному повышению характеристик предела текучести, особенно при снижении температуры. Необходимо отметить, что исследуемые стали выгодно отличаются от 12X18N10T более высоким уровнем предела текучести, а также то, что стали в деформированном состоянии имеют более высокие значения предела текучести (рис. 7).

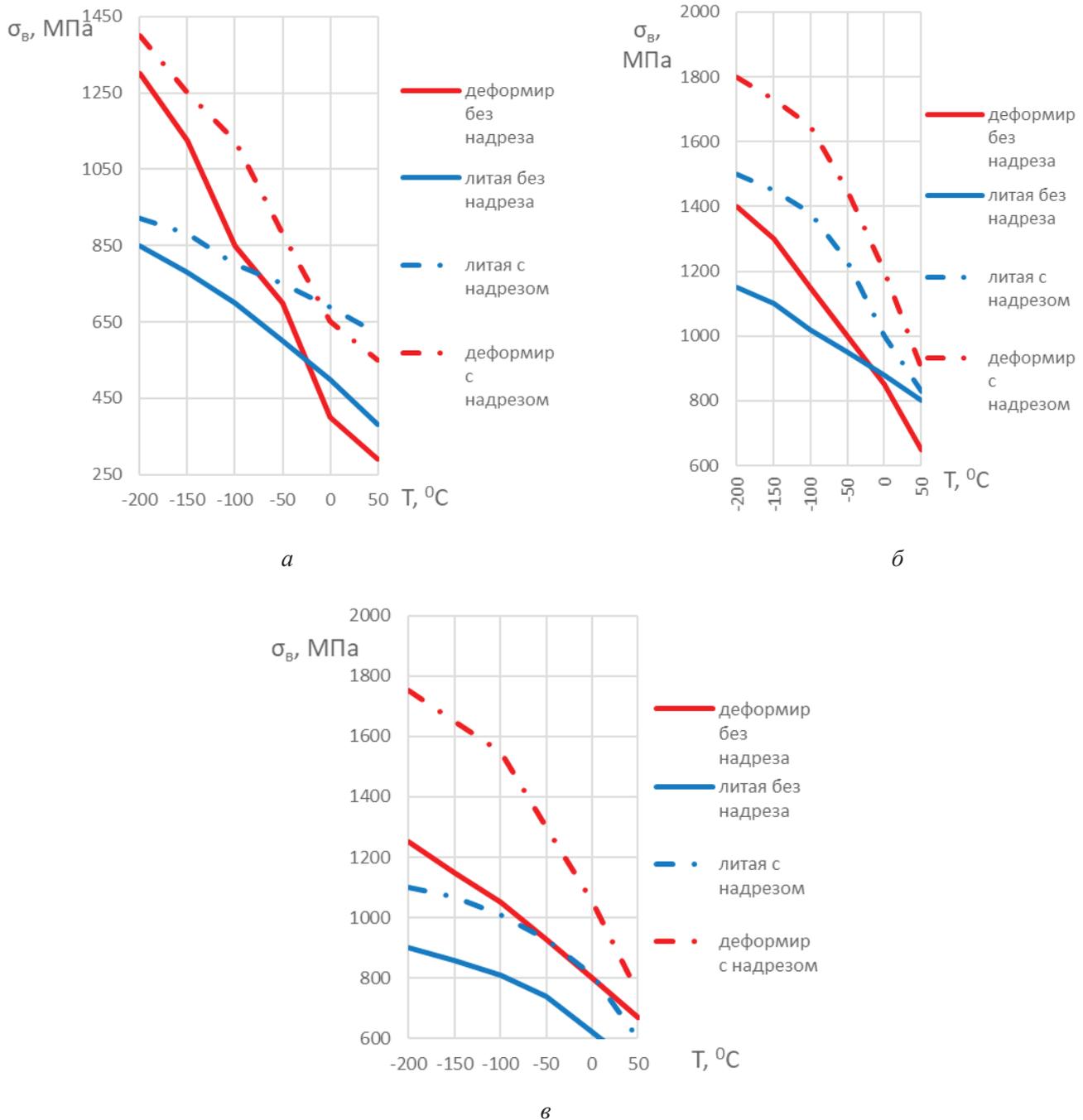


Рис. 6. Влияние низких температур и наличия концентраторов напряжения на величину значений временного сопротивления сталей:

a – 12X18H10T [4]; *б* – 10X14AГ20; *в* – 10X14Г14Н4Т

Fig. 6. The influence of low temperatures and the presence of stress concentrators on the value of the ultimate strength of steels:

a – 12Cr18Ni10Ti [4]; *б* – 10Cr14NMn20; *в* – 10Cr14Mn14Ni4Ti

Кроме этого в работе проведена оценка влияния низких температур и концентраторов напряжений на величину относительного сужения исследуемых сталей в деформированном и литом состоянии. Значение относительного сужения на образцах с надрезом существенно ниже, чем без него. Известно [4], что надрез затрудняет разви-

тие пластической деформации, начинающейся у его вершины, так как доля касательных напряжений резко убывает от надреза к центру образца. Влияние острого глубокого надреза проявляется для всех сталей, независимо от уровня их прочности, типа кристаллической решетки, вязкости и пластичности.

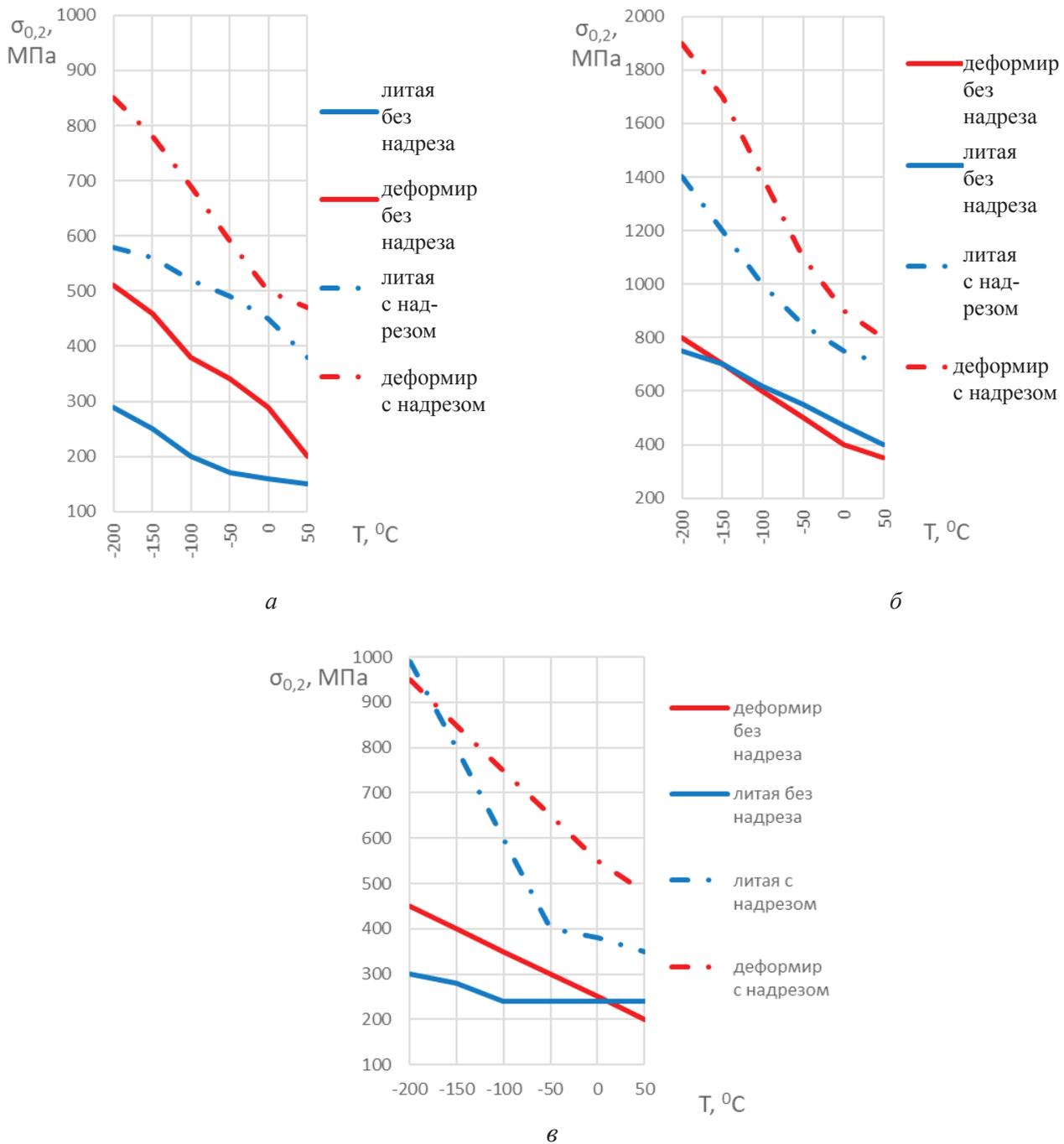


Рис. 7. Влияние низких температур и наличия концентраторов напряжения на величину значений предела текучести стали:

a – 12X18H10T [4]; *б* – 10X14AG20; *в* – 10X14Г14Н4Т

Fig. 7. The influence of low temperatures and the presence of stress concentrators on the value of the ultimate strength of steels:

a – 12Cr18Ni10Ti [4]; *б* – 10Cr14NMn20; *в* – 10Cr14Mn14Ni4Ti

Установлено, что по характеристикам относительного сужения сталь 10X14Г14Н4Т не уступает стали 12X18H10T (рис. 8). Данные по стали 10X14AG20 находятся на допустимом уровне, хотя для литого состояния несколько ниже аналогичных показателей для стали 12X18H10T.

С учетом сложных условий эксплуатации материалов низкотемпературного оборудования в работе проведена оценка влияния низких температур и концентраторов напряжений на значения ударной вязкости исследованных сталей в деформированном состоянии (рис. 9).

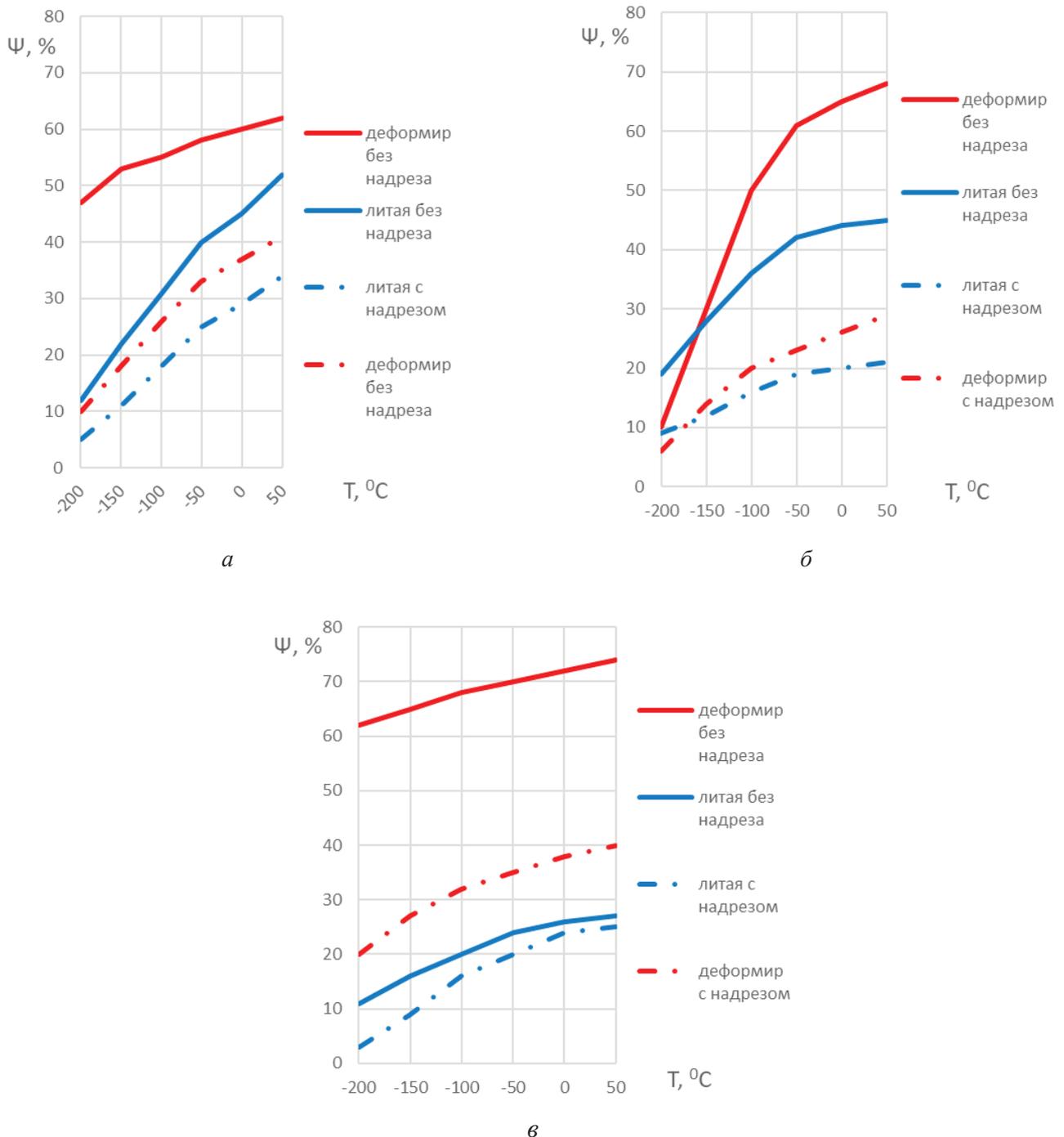


Рис. 8. Влияние низких температур и наличия концентраторов напряжения на относительное сужение стали:

а – 12X18H10T [4]; б – 10X14AG20; в – 10X14Г14Н4Т

Fig. 8. Effect of low temperatures and the presence of stress concentrators on the percentage reduction of area of steel:

а – 12Cr18Ni10Ti [4]; б – 10Cr14NMn20; в – 10Cr14Mn14Ni4Ti

Проведенный всесторонний анализ показал, что для стали 10X14AG20 и стали 10X14Г14Н4Т, находящихся в деформированном состоянии, характерно резкое падение значений ударной вязкости в небольшом

температурном интервале. При этом важным является сохранение достаточно высоких значений ударной вязкости при температуре испытания $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$.

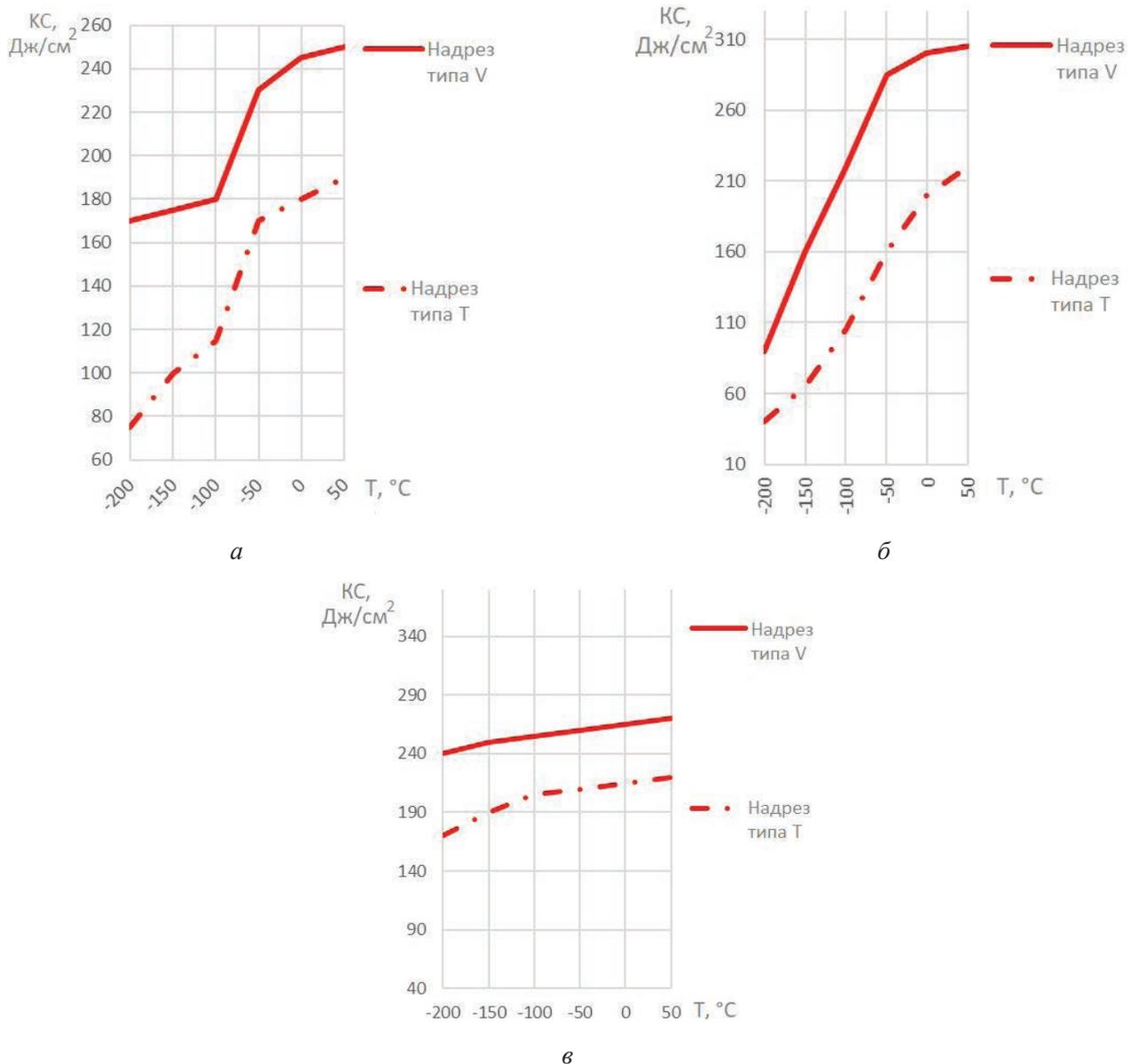


Рис. 9. Влияние низких температур и вида концентратора напряжения на значения ударной вязкости сталей в деформированном состоянии:

a – 12X18H10T[4]; *б* – 10X14AГ20; *в* – 10X14Г14Н4Т

Fig. 9. Effect of low temperatures and the type of stress concentrator on the values of impact strength of steels in the deformed state:

a – 12Cr18Ni10Ti [4]; *б* – 10Cr14NMn20; *в* – 10Cr14Mn14Ni4Ti

Выводы

Установлено, что повышение скорости деформации с $0,34 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ до $0,34 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ и далее до $0,34 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ при температурах ниже $0 \text{ }^\circ\text{C}$ способствует снижению количества мартенситных фаз в исследуемых сталях.

Подтверждено, что наличие концентратора напряжений на цилиндрических образцах в деформированном и литом состоянии при испы-

тании на статическое растяжение обеспечивало повышение значений прочности при снижении значений вязкости и пластичности.

Выявлено, что способность к упрочнению при упругопластическом деформировании уменьшается, и при температуре перехода материала в хрупкое состояние полностью исчезает.

Опытным путем определено, что для нестабильных аустенитных сталей работа разрушения образцов при статическом изгибе ока-

залась меньше, чем при динамическом изгибе. Увеличение скорости низкотемпературной деформации образцов препятствует развитию в сталях фазовых мартенситных превращений.

Установлено, что полученные значения характеристик механических свойств позволяют рекомендовать исследованные метастабильные аустенитные стали в качестве заменителя широко применяемой аустенитной стали 12X18H10T вплоть до температуры $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ как для деформированного, так и для литого состояния.

Список литературы

1. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем / В.В. Москвичев, Н.А. Махутов, А.П. Черняев, А.А. Букаемский, А.Е. Буров, И.А. Зырянов, А.Г. Козлов, И.И. Кокшаров, Г.Г. Крушенко, А.М. Лепихин, А.С. Мишин, Л.Ф. Москвичева, Е.Н. Федорова, А.Н. Цыплук; отв. ред. Ю.И. Шокин. – Новосибирск: Наука, 2002. – 334 с.
2. *Peregudov A.A., Vologzhanina S.A., Igolkin A.F.* Research of properties of austenitic steels // *Key Engineering Materials*. – 2021. – Vol. 887. – P. 242–246. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.887.242.
3. *Солнцев Ю.П., Титова Т.И.* Стали для Севера и Сибири. – СПб.: Химиздат, 2002. – 352 с. – ISBN 5-93808-049-5.
4. *Вологжанина С.А., Иголкин А.Ф., Петкова А.П.* Исследование влияния низких температур и деформаций на свойства аустенитной стали 12X18H10T // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. – 2019. – Т. 25, № 4. – P. 83–93. – DOI: 10.18721/JEST.25407.
5. Resistance to brittle fracture and availability of austenitic steels / B.S. Ermakov, S.A. Vologzhanina, I.N. Bobrovskij, N.M. Bobrovskij, Y. Erisov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 450, iss. 3. – P. 032041. – DOI: 10.1088/1757-899X/450/3/032041.
6. Разработка перспективных образцов криогенных сталей для газозовов и стационарных танков-хранилищ сжиженного природного газа, предназначенных для использования в условиях Арктики / М.Ю. Матросов, В.Н. Зикеев, П.Г. Мартынов, Е.В. Шульга, В.С. Никитин, В.Н. Половинкин, Ю.А. Симонов, А.А. Семин // *Арктика: экология и экономика*. – 2016. – № 4 (24). – С. 80–89.
7. *Горынин В.И., Оленин М.И.* Пути повышения хладостойкости стали и сварных соединений. – СПб.: Прометей, 2017. – 341 с.
8. Концепция карбидного конструирования сталей повышенной хладостойкости / В.И. Горынин, С.Ю. Кондратьев, М.И. Оленин, В.В. Рогожкин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2014. – № 10 (712). – С. 32–38.
9. *Горынин В.И., Кондратьев С.Ю., Оленин М.И.* Повышение сопротивляемости хрупкому разрушению перлитных и мартенситных сталей при термическом воздействии на морфологию карбидной фазы // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2013. – № 10 (700). – С. 22–29.
10. *Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И.* Структура и свойства хладостойких сталей для конструкций северного исполнения // *Вопросы материаловедения*. – 2006. – № 1 (45). – С. 24–44.
11. *Костина М.В., Банных О.А., Блинов В.М.* Новый немагнитный Fe–Cr–N высокопрочный коррозионно- и износостойкий сплав. Ч. 1. Влияние хрома и азота на структуру и фазовый состав Fe–Cr–N сплавов // *Электрометаллургия*. – 2005. – № 12. – С. 26–32.
12. Production technology for arctic pipeline and marine steel / V.V. Orlov, V.A. Malyshevskii, E.I. Khlusova, S.A. Golosienko // *Steel in Translation*. – 2014. – Vol. 9, iss. 44. – P. 696–705. – DOI: 10.3103/S0967091214090113.
13. Structure and mechanical properties of high-strength structural steels / O.A. Bannykh, I.O. Bannykh, E.I. Lukin, A.M. Sorokin // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2018. – N 6. – P. 528–532. – DOI: 10.1134/S0036029518060046.
14. Industrial use of austenitic and duplex HNS-manufacture, application and properties / T. Schneiders, R. Ritzenhoff, H. Jung, C. Herrera, A. Bauch // *Proceedings of 12th International Conference on High Nitrogen Steels*. – Hamburg, 2014. – P. 120–127.
15. *Kostina M.V., Bannykh O.A., Blinov V.M.* New nonmagnetic chromium-nitrogen iron-based steel // *Proceedings of 7th International Conference “High Nitrogen Steels”*, Belgium, Ostende, 19–22 September, 2004. – Belgium, 2004. – P. 395–403.
16. High strength stainless austenitic Cr–Mn–C–N steels – Part I: Alloy design and properties / H. Berns, V.G. Gavriljuk, S. Riedner, A. Tyshchenko // *Steel Research International*. – 2007. – Vol. 78, N 9. – P. 714–719.
17. Высокоазотистые стали / Ц.В. Рашев, А.В. Елисеев, Л.Ц. Жекова, П.В. Богев // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2019. – Т. 62, № 7. – С. 503–510.
18. The effect of cold rolling regime on microstructure and mechanical properties of AISI 304L stainless steel / A. Hedayati, A. Najafizadeh, A. Kermanpur, F. Forouzan // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2010. – Vol. 210, iss. 8. – P. 1017–1022. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.02.010.
19. Получение мартенситной стали 10X3A со сверхравновесной концентрацией азота методом

ЭШПД / М.В. Костина, Л.Г. Ригина, В.М. Блинов, С.О. Мурадян // Сборник трудов XV Международного конгресса сталеплавильщиков. – Тула, 2018. – С. 166–172.

20. Corrosion stability of austenitic steels 05Kh22AG15N8M2F and 12Kh18N10T in chloride-containing media / S.V. Gnedkov, S.L. Sinebryukhov, V.S. Egorkin, I.E. Vyaliy, I.M. Imshinetskiy, M.V. Kostina, S.O. Muradyan, V.I. Sergienko // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2017. – Vol. 53, N 5. – P. 910–915.

21. Сравнительный анализ данных при оценке свойств материалов сварных соединений / С.А. Вологжанина, А.П. Петкова, А.Ф. Иголкин, А.А. Перегудов // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2019. – № 8. – С. 23–27.

22. *Stein G., Hucklenbroich I.* Manufacturing and applications of high nitrogen steels // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2004. – Vol. 19, iss. 1. – P. 7–17. – DOI: 10.1081/AMP-120027494.

23. *Gavriljuk V.G., Berns H.* High nitrogen steels: structure, properties, manufacture, applications. – Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1999. – 378 p. – DOI: 10.1007/978-3-662-03760-7. – ISBN 978-3-662-08567-3 (softcover). – ISBN 978-3-540-66411-6 (hardcover). – ISBN 978-3-662-03760-7 (ebook).

24. Fretting fatigue behaviour of Ni-free high-nitrogen stainless steel in a simulated body fluid / N. Maruyama, S. Hiromoto, E. Akiyama, M. Nakamura // *Science and Technology of Advanced Materials*. – 2013. – Vol. 14, iss. 2. – Art. 025002. – DOI: 10.1088/1468-6996/14/2/025002.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Effect of the deformation degree at low temperatures on the phase transformations and properties of metastable austenitic steels

Svetlana Vologzhanina ^{1, a, *}, Alexey Igolkin ^{2, b}, Alexey Peregudov ^{3, c}, Igor Baranov ^{2, d},
Nikita Martyshev ^{4, e}

¹ Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg, 199106, Russian Federation

² ITMO University, 49 Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russian Federation

³ SUE "Petersburg Metro", 28 Moskovskiy Prospekt, St. Petersburg, 190013, Russian Federation

⁴ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-7675-865X>, svet_spb@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-8287-1851>, igolkin47@mail.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-1273-0743>, mikki435@gmail.com, ^d <https://orcid.org/0000-0003-0595-368X>, ivbaranov@itmo.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>, martjushev@tpu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 30 December 2021

Revised: 21 January 2022

Accepted: 15 February 2022

Available online: 15 March 2022

Keywords:

Metastable austenitic steel

Low temperatures

Phase-structural transformations

Strain rate

Martensite

Mechanical properties

ABSTRACT

Introduction. For reliable operation of low-temperature equipment, it is necessary to use materials capable of ensuring operability in a wide temperature range under conditions of alternating loads, exposure to corrosive media, etc. Most often, in such cases, metastable austenitic steels (MAS) of various alloying systems are used. Despite sufficient experience in the use of such materials, not enough information is collected on the behavior of such materials at low temperatures, including phase-structural transformations, the features of such transformations in different temperature zones, including when a load is applied, both static and dynamic. **The subject of the study** in this work is selected MAS 10Cr14Mn20 and 10Cr14Mn14Ni4Ti grades. **The purpose of the study** is to evaluate the performance of industrially used metastable austenitic steels for its possible use instead of steel 12Cr18Ni10Ti. **Research methodology.** The phase composition of the samples was studied on a DRON-3.0 X-ray diffractometer. Mechanical tests were carried out in the temperature range from +20 to –196 °C. Static uniaxial tensile tests were carried out on a R-20 tensile testing machine; cylindrical specimens with threaded heads were prepared according to GOST 11150–75, as well as samples with a circumferential notches. Dynamic bending tests were carried out on a pendulum impact tester, using samples according to GOST 9454–78. **Results and Discussion.** Based on the data obtained, it is found that an increase in the strain rate at low temperatures contributes to a decrease in the number of martensitic phases in the steels under study. It is found that the hardenability during elastic-plastic deformation decreases and completely disappears at the temperature of the material transition to a brittle state. It is shown that an increase in the rate of low-temperature deformation of samples prevents the development of phase martensitic transformations in steels. The results obtained can be recommended for use in the selection of materials for the manufacture of equipment operating at temperatures down to –196 °C. **Conclusions.** It is shown that the obtained values of the characteristics of mechanical properties make it possible to recommend the studied MAS as a substitute for steel 12Cr18Ni10Ti, down to a temperature of –196 °C.

For citation: Vologzhanina S.A., Igolkin A.F., Peregudov A.A., Baranov I.V., Martyshev N.V. Effect of the deformation degree at low temperatures on the phase transformations and properties of metastable austenitic steels. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 73–86. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-73-86. (In Russian).

References

1. Shokin Yu.I., ed., Moskvichev V.V., Makhutov N.A., Chernyaev A.P., Bukaemskii A.A., Burov A.E., Zyryanov I.A., Kozlov A.G., Koksharov I.I., Krushenko G.G., Lepikhin A.M., Mishin A.S., Moskvicheva L.F., Fedorova E.N., Tsypluk A.N. *Treshchinostoikost' i mekhanicheskie svoistva konstruktsionnykh materialov*

* Corresponding author

Vologzhanina Svetlana A., D.Sc. (Engineering), Professor

Saint Petersburg Mining University

2, 21st Line, St Petersburg, 199106, Russian Federation

Tel.: +79213491682, e-mail: svet_spb@mail.ru

tekhnikeskikh sistem [Crack resistance and mechanical properties of structural materials of technical systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2002. 334 p.

2. Peregudov A.A., Vologzhanina S.A., Igolkin A.F. Research of properties of austenitic steels. *Key Engineering Materials*, 2021, vol. 887, pp. 242–246. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.887.242.

3. Solntsev Yu.P., Titova T.I. *Stali dlya Severa i Sibiri* [Steels for the North and Siberia]. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2008. 352 p. ISBN 5-93808-049-5.

4. Vologzhanina S.A., Igolkin A.F., Petkova A. Issledovanie vliyaniya nizkikh temperatur i deformatsii na svoistva austenitnoi stali 12Kh18N10T [Study of the effect of low temperatures and deformations on the properties of austenitic steel 12Kh18N10T]. *Nauchno-tekhnikeskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki = St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 83–93. DOI: 10.18721/JEST.25407.

5. Ermakov B.S., Vologzhanina S.A., Bobrovskij I.N., Bobrovskij N.M., Erisov Y. Resistance to brittle fracture and availability of austenitic steels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 450, iss. 3, p. 032041. DOI: 10.1088/1757-899X/450/3/032041.

6. Matrosov M.Yu., Zikeev V.N., Martynov P.G., Shulga E.V., Nikitin V.S., Polovinkin V.N., Simonov Yu.A., Semin A.A. Razrabotka perspektivnykh obraztsov kriogennykh staley dlya gazovozov i stacionarnykh tankov-khranilishch szhizhennogo prirodno gaza, prednaznachennykh dlya ispol'zovaniya v usloviyakh Arktiki [Development of advanced patterns of cryogenic steels for gas vessels and stationary storage tanks of liquefied natural gas designed for Arctic conditions]. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*, 2016, vol. 4 (24), pp. 80–89.

7. Gorynin V.I., Olenin M.I. *Puti povysheniya khladostoikosti stali i svarnykh soedinenii* [Ways to increase cold resistance of steel and welded joints]. St. Petersburg, Prometei Publ., 2017. 341 p.

8. Gorynin V.I., Kondrat'ev S.Yu., Olenin M.I., Rogozhkin V.V. Kontsepsiya karbidnogo konstruirovaniya staley povyshennoi khladostoikosti [A concept of carbide design of steels with improved cold resistance]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2014, no. 10 (712), pp. 32–38. (In Russian).

9. Gorynin V.I., Kondrat'ev S.Yu., Olenin M.I. Povyshenie soprotivlyaemosti khrupkomu razrusheniyu perlitnykh i martensitnykh staley pri termicheskom vozdeistvii na morfologiyu karbidnoi fazy [Raising the resistance of pearlitic and martensitic steels to brittle fracture under thermal action on the morphology of the carbide phase]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2013, no. 10 (700), pp. 22–29. (In Russian).

10. Rybin V.V., Malyshevskiy V.A., Khlusova E.I. Struktura i svoistva khladostoikikh staley dlya konstruksii severnogo ispolneniya [Structure and the properties of cold-resistant steels for the constructions of Northern design]. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, no. 1 (45), pp. 24–44. (In Russian).

11. Kostina M.V., Bannykh O.A., Blinov V.M. Novyi nemagnitnyi Fe–Cr–N vysokoprochnyi korroziionno- i iznosostoikii splav. Ch. 1. Vliyanie khroma i azota na strukturu i fazovyi sostav Fe–Cr–N splavov [New non-magnetic Fe–Cr–N high strength corrosion and wear resistant alloy. Part I. Influence of chromium and nitrogen on the structure and phase composition of Fe–Cr–N alloys]. *Elektrometallurgiya*, 2005, no. 12, pp. 26–32. (In Russian).

12. Orlov V.V., Malyshevskii V.A., Khlusova E.I., Golosienko S.A. Production technology for arctic pipeline and marine steel. *Steel in Translation*, 2014, vol. 9, iss. 44, pp. 696–705. DOI: 10.3103/S0967091214090113.

13. Bannykh O.A., Bannykh I.O., Lukin E.I., Sorokin A.M. Structure and mechanical properties of high-strength structural steels. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2018, no. 6, pp. 528–532. DOI: 10.1134/S0036029518060046.

14. Schneiders T., Ritzenhoff R., Jung H., Herrera C., Bauch A. Industrial use of austenitic and duplex HNS-manufacture, application and properties. *Proceedings of 12th International Conference on High Nitrogen Steels*, Hamburg, 2014, pp. 120–127.

15. Kostina M.V., Bannykh O.A., Blinov V.M. New nonmagnetic chromium-nitrogen iron-based steel. *Proceedings of 7th International Conference "High Nitrogen Steels"*, Belgium, Ostende, 19–22 September, 2004, pp. 395–403.

16. Berns H., Gavriljuk V.G., Riedner S., Tyshchenko A. High strength stainless austenitic Cr-Mn-C-N steels – Part I: Alloy design and properties. *Steel Research International*, 2007, vol. 78, no. 9, pp. 714–719.

17. Rashev Ts.V., Eliseev A.V., Zhekova L.Ts., Bogevev P.V. Vysokoazotistye stali [High-nitrogen steels]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2019, vol. 62, no. 7, pp. 503–510.

18. Hedayati A., Najafzadeh A., Kermanpur A., Forouzan F. The effect of cold rolling regime on microstructure and mechanical properties of AISI 304L stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, iss. 8, pp. 1017–1022. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.02.010.

19. Kostina M.V., Rigina L.G., Blinov V.M., Muradyan S.O. [Obtaining martensitic steel 10Kh3A with superequilibrium nitrogen concentration by the ESHPD method]. *Sbornik trudov XV Mezhdunarodnogo kongressa*

staleplavil'shchikov [Proceedings of the XV International Congress of Steelworkers]. Tula, 2018, pp. 166–172. (In Russian).

20. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Egorkin V.S., Vyaliy I.E., Imshinetskiy I.M., Kostina M.V., Muradyan S.O., Sergienko V.I. Corrosion stability of austenitic steels 05Kh22AG15N8M2F and 12Kh18N10T in chloride-containing media. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2017, vol. 53, no. 5, pp. 910–915.

21. Vologzhanina S.A., Petkova A.P., Igolkin A.F., Peregudov A.A. Sravnitel'nyi analiz dannykh pri otsenke svoystv materialov svarnykh soedinenii [Comparative analysis of data in assessing the properties of materials of welded joints]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2019, no. 8, pp. 23–27.

22. Stein G., Hucklenbroich I. Manufacturing and applications of high nitrogen steels. *Materials and Manufacturing Processes*, 2004, vol. 19, iss. 1, pp. 7–17. DOI: 10.1081/AMP-120027494.

23. Gavriljuk V.G., Berns H. High nitrogen steels: structure, properties, manufacture, applications. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 1999. 378 p. DOI: 10.1007/978-3-662-03760-7. ISBN 978-3-642-08567-3. ISBN 978-3-540-66411-6. ISBN 978-3-662-03760-7.

24. Maruyama N., Hiromoto S., Akiyama E., Nakamura M. Fretting fatigue behaviour of Ni-free high-nitrogen stainless steel in a simulated body fluid. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2013, vol. 14, iss. 2, art. 025002. DOI: 10.1088/1468-6996/14/2/025002.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).