УДК 548.73:66-974:620.172.251.1
doi: https://doi.org/10.18323/2782-4039-2026-2-76-5

Особенности кристаллической структуры литой нержавеющей CrMnCN стали до и после низкотемпературного деформирования

Наркевич Наталья Аркадьевна*[1,3], кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник
Бадулин Никита[1,2,4], лаборант, студент
Власов Илья Викторович[1,5], кандидат технических наук, научный сотрудник
[1]*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*
[2]*Томский политехнический университет, Томск, Россия*

***E-mail:** natnark@list.ru

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5179-1955
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2792-7658
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9110-8313

Поступила в редакцию 30.06.2025 *Пересмотрена 09.07.2025* *Принята к публикации 02.06.2026*

Аннотация: **Проблема.** Хладостойкие хромоникелевые нержавеющие стали обладают низкими прочностными свойствами. Для их замены требуются стали с повышенными прочностными характеристиками и более дешевые. Этим требованиям отвечают стали, легированные азотом и углеродом, однако их кристаллическая структура при низких температурах изучена недостаточно. **Цель.** Определить влияние низких температур и низкотемпературного деформирования на параметры кристаллической структуры безникелевой аустенитной стали с высоким содержанием элементов внедрения. **Методы.** Кристаллическую структуру литой CrMnCN стали с содержанием (C+N)=1,27 мас.% исследовали рентгеноструктурными методами в интервале температур от −190 до 20 °C. Предварительно сталь гомогенизировали при 1000 °C, затем подогревали до 1150 °C и закаливали в воде. Испытания на растяжение проводили при температурах от −196 до 20 °C. После испытаний анализировали кристаллическую структуру. **Результаты.** После закалки дендритная структура стали состоит из аустенита с параметром решетки *a*=3,6405 Å и скоплений дисперсных частиц. При охлаждении стали параметр ГЦК решетки уменьшался, а в образцах, испытанных на растяжение, увеличивался при снижении температуры испытаний. При криогенной температуре испытаний кристаллическая решетка проявляет свойство ауксетика. При охлаждении и низкотемпературном деформировании в стали образуются дефекты упаковки (ДУ). После испытаний при −196 °C концентрация ДУ в 2 раза выше, чем в стали, охлажденной до этой же температуры. Сочетание низкой пластичности стали при −196 °C, малой величины работы пластической деформации с высокой дисперсностью областей когерентного рассеяния (ОКР) свидетельствует о начале мартенситных превращений. **Выводы.** При охлаждении стали параметр решетки уменьшается. При низкотемпературном деформировании параметр ГЦК решетки, наоборот, увеличивается и при −196 °C сталь проявляет свойство ауксетика. Особенностью отклика кристаллической структуры на низкотемпературное деформирование является увеличение концентрации ДУ и малая величина ОКР.

Ключевые слова: литая сталь; закалка; аустенит; низкие температуры; испытания на растяжение; ауксетик; дефект упаковки; микродеформации

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 25-29-00027. Дифрактометрические исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН».

Статья подготовлена по материалам докладов участников XII Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2025), Тольятти, 15–19 сентября 2025 года.

Для цитирования: Наркевич Н.А., Бадулин Н., Власов И.В. Особенности кристаллической структуры литой нержавеющей CrMnCN стали до и после низкотемпературного деформирования // Frontier Materials & Technologies. 2026. № 2. С. 55–64. DOI: https://doi.org/10.18323/2782-4039-2026-2-76-5.

ВВЕДЕНИЕ

Для применения в северных широтах критически важное значение имеет разработка хладостойких безникелевых нержавеющих высокопрочных Cr-Mn сталей, легированных азотом. Связано это с тем, что масштабы производства и разработка Ni-содержащих аустенитных сталей сильно ограничены нехваткой Ni и ростом цен на этот металл на мировом рынке [1].

Cr-Mn азотсодержащие стали превосходят Cr-Ni по прочностным свойствам не уступают в коррозионной стойкости, имеют существенно более низкую стоимость [2–4]. Полное или частичное замещение никеля сильными аустенитообразующими элементами – азотом или одновременно азотом и углеродом является перспективным для расширения рамок применения этого класса сталей, в частности при низких климатических температурах.

В отличие от Cr-Ni сталей ГЦК решетка аустенита, легированная азотом, испытывает высокие локальные микронапряжения [5–8]. Искажения ГЦК решетки обусловлены не столько присутствием в составе Mn и Cr

© Наркевич Н.А., Бадулин Н., Власов И.В., 2026

(в сумме 30–40 % масс.) с близкими размерами радиусов атомов с атомами Fe и образующих твердый раствор замещения, сколько легированием азотом и углеродом (в сумме от 1 до 1,5 % масс.), образующих твердый раствор внедрения. Благодаря этому параметр и объем ГЦК решетки увеличен более чем на 1,5 % в сравнении с CrNi сталями. Искажения кристаллической решетки вызывают формирование внутренних напряжений различного масштаба и, в значительной степени, обусловливают физико-механические свойства и деформационное поведение сталей [8].

Исследованию температурных зависимостей ударной вязкости и причин вязко-хрупкого перехода в сталях с высоким содержанием элементов внедрения посвящены работы [5; 9–18]. Важную роль в повышении порога хладноломкости играет $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращение, связанное с потерей стабильности аустенита при низких температурах испытаний [5].

В аустенитных азотсодержащих сталях температура вязкохрупкого перехода при увеличении концентрации азота повышается [9–11], что наблюдается и в сталях с бейнитной структурой [12]. В то же время экспериментальные данные [13] показывают, что литая сталь с 0,5 % N (марка 05Х21АГ15Н8МФЛ) во всем интервале климатических температур превосходит величину ударной вязкости литой стали типа 18Cr – 10Ni. Неметаллические включения, присутствующие в аустените существенного влияния на ударную вязкость и микромеханизм разрушения не оказывают [13]. На проявление низкотемпературной хрупкости при разрушении высокоазотистых сталей влияет ε-мартенсит с ГПУ решеткой [14; 15], деформации ГЦК решетки, формирующиеся в процессе охлаждения (без нагружения) [16] и усиливающиеся при низкотемпературном деформировании [5]. Показано также, что в хрупком разрушении сколом задействованы плотноупакованные плоскости $\{111\}\gamma$ [6; 17; 18]. Несмотря на перечисленные наблюдения, характер изменений кристаллической структуры и его влияние на механизм разрушения при низкотемпературном нагружении не выяснен.

При изготовлении листового проката проволоки прутков, труб и т.д. из нержавеющих CrNi сталей используются технологии горячей или холодной прокатки, или термомеханическая обработка. Для сталей с высоким содержанием элементов внедрения эти способы неприменимы, поскольку в них при повышенных температурах аустенит распадается с выделением дисперсных частиц нитридов хрома Cr2N по прерывистому механизму [4]. Это, в свою очередь уменьшает коррозионную стойкость сталей, ее прочностные характеристики и пластичность. При холодном деформировании стали этого класса часто растрескиваются, поскольку обладают высоким деформационным упрочнением. Наиболее простым и технологичным способом для массового производства стальных изделий является литье. Отливки, обладающие высокой коррозионной стойкостью, прочностью и износостойкостью так же, как и прокат, востребованы для применения при низких температурах. Это элементы запорной арматуры, корпусные изделия сложной формы различного рода уплотнители и т.д. Таким образом, несмотря на перспективность использования литых изделий из безникелевых аустенитных сталей с высоким содержанием элементов внедрения при пониженных температурах, характер изменений кристаллической структуры при охлаждении и низкотемпературном деформировании, остаются невыясненными.

Цель настоящей работы – исследовать влияние охлаждения и статических нагрузок при низких температурах на параметры кристаллической структуры литой CrMnCN стали.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал

В работе исследована CrMnCN сталь в литом состоянии (не деформированная), полученная плавкой в индукционной печи в атмосферных условиях (таблица 1).

Термическая обработка

Образцы подвергали гомогенизационному отжигу при 1000 °C в течение 3 ч, дополнительно нагревали до 1150 °C с выдержкой 40 мин для растворения вторичных фаз, затем охлаждали в воде.

Подготовка образцов

Все образцы вырезали на электроэрозионном станке. Для исследований структуры использовали образцы размерами 10×10 мм и толщиной 2 мм. Поверхность образцов шлифовали и полировали алмазными пастами. Структуру выявляли травлением раствором кислот HCl и HNO_3 в глицерине в соотношении 2:1:3 и исследовали на оптическом микроскопе (ОМ) Axiovert-25CA (Carl Zeiss, Германия) и сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Vega 3 SB (Tescan, Греция).

Для рентгеноструктурных исследований использовали более тонкие образцы (для уменьшения погрешности температуры образца) толщиной 0,15 мм и площадью 10 мм^2.

Испытания на статическое растяжение проводили с использованием плоских образцов с длиной в рабочей части 15 мм, шириной 2,5 мм и толщиной 1 мм.

Образцы перед всеми исследованиями электролитически полировали в растворе H_3PO_4 (430 мл)+CrO_3 (50 г) для удаления наклепанного слоя.

Рентгеноструктурный анализ

Фазовый состав и искажения кристаллической решетки аустенита <ε> определяли методами рентгеновской дифрактометрии на приборе ДРОН-8Н (ИЦ Буревестник, Санкт-Петербург, Россия) в фильтрованном $Cu_{K\alpha}$ излучении с шагом 0,08° и системой быстрой регистрации отраженной интенсивности в геометрии по Брэггу–Брентано.

Дифрактометрические исследования стали проводили при температурах 20, −30, −60, −90, −120 и −190 °C в вакуумной камере. Анализ дифрактограмм включал (1) определение параметра решетки *a* экстраполированием функции Нельсона-Райли[1], построенной по межплоскостным расстояниям для всех кристаллографических плоскостей, попадающих в угловой интервал съемки дифрактограммы (2Θ от 40° до 122°); (2) определение концентрации дефектов упаковки (ДУ) α по углам 2Θ, соответствующим положению дифракционных максимумов плоскостей (111) и (200)[2]; (3) определение микродеформаций

[1] *Diffraction Analysis of the Microstructure of Materials / ed. E.J. Mittemeijer, P. Scardi. Berlin: Springer Verlag, 2004. 554 p. P. 333–499.*

[2] *Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСиС, 2002. 357 с.*

ГЦК решетки <ε> и величины областей когерентного рассеяния (ОКР). При этом исходили из увеличения полуширин дифракционных максимумов деформированных образцов в сравнении с образцом после закалки[3]. Погрешность определения углового положения центров тяжести дифракционных максимумов и их полуширин, используемых для расчетов всех параметров ГЦК решетки, не превышала 0,01°.

После низкотемпературных испытаний снова проводили дифрактометрические съемки образцов при комнатной температуре без вращения с последующим определением всех вышеперечисленных параметров кристаллической структуры.

Механические испытания

Механические испытания проводили на машине INSTRON 5582 (Norwood, OG, USA) при температурах 20, −30, −40, −60, −70, −90, −105, −196 °C со скоростью деформирования $1{,}87 \cdot 10^{-4}$ $с^{-1}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

После закалки в структуре стали сохраняются морфологические особенности, присущие дендритной структуре. Основной фазой в ней является аустенит с параметром ГЦК решетки *a*=3,6405 Å, свободный от выделений. Дисперсные включения являются оксикарбидами и карбидами хрома, как было показано в работе [19]. Частицы распределены неоднородно и образуют скопления рис. 1. Присутствие в структуре дисперсных частиц свидетельствует о предельном для температуры 1150 °C насыщение твердого раствора легирующими элементами.

При охлаждении стали параметр ГЦК решетки аустенита снижался, в то время как в образцах после испытаний на растяжение в интервале температур от 20 до −196 °C, наоборот, отмечено его увеличение, рис. 2 a.

Максимальное различие параметров в охлажденном и деформированном образцах наблюдается при температуре −196 °C. Изменение параметра ГЦК решетки, исследованное после растяжения при 20 и −196 °C в сравнении с закаленным состоянием видно на экстраполяционных зависимостях Нельсона Райли, рис. 2 b. Увеличение параметра ГЦК решетки после низкотемпературного деформирования в поперечном направлении при одновременном удлинении образца вдоль оси растяжения означает не сужение его, а наоборот, уширение. Увеличение параметра ГЦК решетки в поперечном направлении после испытаний при −196 °C составило 0,14 % относительно параметра, измеренного до нагружения при комнатной температуре (рис. 2 a).

На рис. 2 b видно, что отклонения экспериментальных точек (особенно (200)) от линейной зависимости Нельсона–Райли в образце, испытанном при −196 °C (прямая 3) больше, чем в стали до испытаний (прямая 1), а также испытанной при 20 °C (прямая 2) при одинаковых условиях съемки при комнатной температуре. Соединение точек, полученных для каждого образца, образует ломаную линию, которая располагается выше и ниже экстраполяционной прямой.

При −196 °C концентрация ДУ в деформированной стали в 2 раза выше, чем в недеформированной, охлажденной до той же температуры. (рис. 3).

Исследование механических свойств показало, что наряду с высокими прочностными свойствами сталь при низкотемпературном растяжении в интервале температур от −90 до 20 °C демонстрирует удовлетворительную пластичность (относительное удлинение не ниже 10 %). При температуре жидкого азота сталь хрупко разрушалась на пределе текучести. В стали, обладающей такими пластическими свойствами, величина ОКР (D) имеет нанометровый масштаб (20–27 нм), в том числе при −196 °C (рис. 4). Остаточные микродеформации <ε>, связанные с микронапряжениями II рода (уравновешивающимися в объеме зерен) после деформирования при комнатной температуре имеют большую величину ~0.11 % (рис. 4). При более низких температурах <ε> близки к нулевым значениям.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследованию искажений ГЦК решетки и ее параметра при охлаждении высокоазотистых сталей посвящены работы [7; 8]. Одной из причин немонотонного уменьшения параметра решетки называется магнитное упорядочение при охлаждении ниже температуры Нееля (*TN*), обусловленное переходом из парамагнитного в антиферромагнитное состояние. Стабилизация параметра решетки (ниже −90 °C, рис. 2 a, кривая 1) обусловлено проявлением инварного эффекта. В то же время, уменьшение параметра решетки и, следовательно, ее объема может быть следствием термического сжатия [16], а стабилизация параметра (рис. 2 a, кривая 2*)* является результатом ограниченной способности ГЦК решетки, содержащей внедренные атомы азота и углерода, уменьшаться в размерах. Ведь сами атомы сжиматься не могут.

Закономерные разнонаправленные смещения дифракционных максимумов плоскостей первого и второго порядка свидетельствуют об образовании в кубических кристаллах ДУ4. Наблюдаемое увеличение концентрации ДУ в стали Гадфильда при снижении температуры интерпретируется авторами [20] как результат микропластической деформации. Еще в большей степени концентрация ДУ увеличивается в исследуемой стали при низкотемпературном деформировании. Это закономерно, поскольку в высокоазотистых сталях при снижении температуры снижается энергия ДУ [21]. Таким образом, процесс образования ДУ в сталях и сплавах с низкой энергией ДУ при деформировании является закономерным и необратимым элементом структурной релаксации напряжений. ДУ с ГПУ решеткой являются зародышами кристаллов ε мартенсита и, следовательно, предвестниками γ→ε превращения, при котором образуется мартенсит с ГПУ решеткой. В этой связи можно говорить о том, что снижение температуры испытаний способствует увеличению концентрации ДУ и дестабилизации ГЦК решетки.

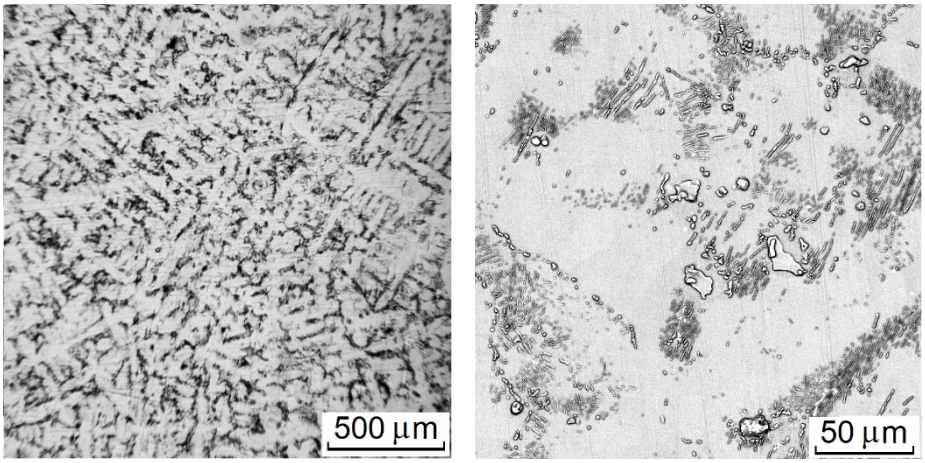
Вопрос о стабильности CrMnCN сталей с высокой концентрацией ДУ дискуссионный. Из анализа экспериментальных результатов работы [22], следует, что совместное легирование углеродом и азотом CrMn сталей

[3] *Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСиС, 2002. 357 с.*

[4] *Там же.*

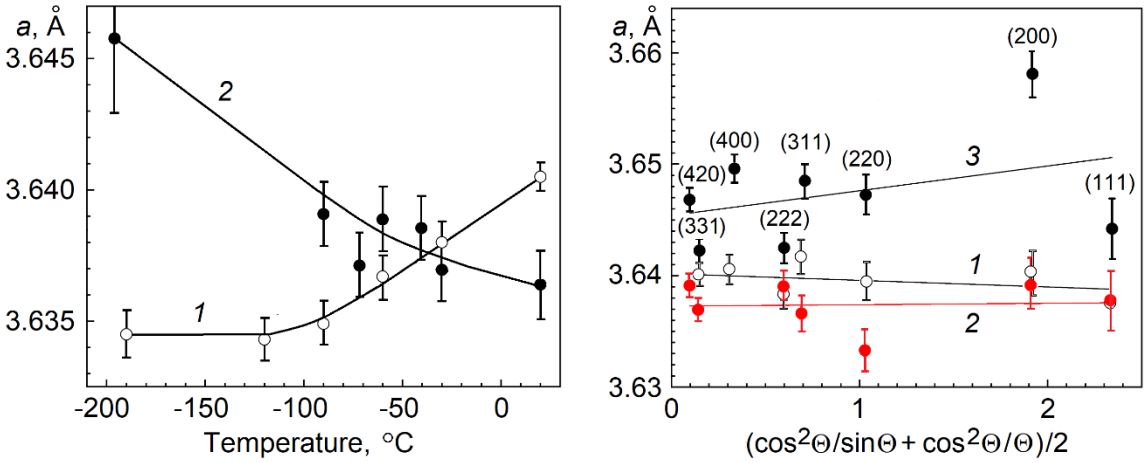
Таблица 1. *Химический состав литой CrMnCN стали, %, мас.*
Table 1. *Chemical composition of cast CrMnCN steel, wt.%*

Состав	Cr	Mn	Si	Ni	C	N	P	S	Fe
мас.%	24,4	16,4	1,1	0,18	0,57	0,7	0,002	0,017	Ост.



a ***b***

Рис. 1. *Структура CrMnCN стали после закалки:*
a *– оптическая микроскопия (ОМ);* ***b*** *– сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)*
Fig. 1. *Structure of CrMnCN steel after quenching:*
a *– optical microscopy (OM);* ***b*** *– scanning electron microscopy (SEM)*



a ***b***

Рис. 2. *Температурные зависимости параметра ГЦК решетки CrMnCN стали:*
a *– до механических испытаний (1), после испытаний (2);* ***b*** *– функция Нельсона–Райли до механических испытаний (1), после испытаний при 20 °C (2), после испытаний при −196 °C (3)*
Fig. 2. *Temperature dependences of the FCC lattice parameter of CrMnCN steel:*
a *– before mechanical testing (1), after testing (2);* ***b*** *– Nelson–Riley function before mechanical testing (1), after testing at 20 °C (2), after testing at −196 °C (3)*

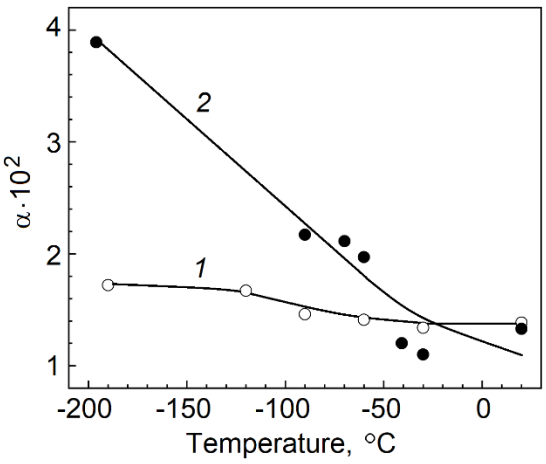


Рис. 3. *Температурные зависимости концентрации ДУ α в ГЦК решетке CrMnCN стали: до механических испытаний (1), после испытаний (2)*
Fig. 3. *Temperature dependences of the stacking fault (SF) concentration α in the FCC lattice of CrMnCN steel: before mechanical testing (1), after testing (2)*

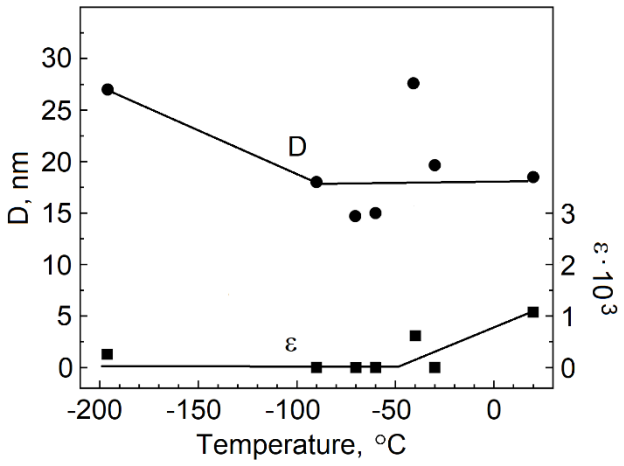


Рис. 4. *Температурные зависимости величины ОКР D в деформированной CrMnCN стали и искажений ГЦК решетки <ε>, связанных с микронапряжениями II рода*
Fig. 4. *Temperature dependences of the coherent scattering region (CSR) size D in deformed CrMnCN steel and of the FCC lattice distortions <ε> associated with type II microstresses*

оказывает более сильное стабилизирующее влияние, чем углерод или азот по отдельности. Так в стали Fe60Cr20Mn20(C+N)0.96 близкого состава к исследуемой температуре магнитного превращения антиферромагнетик/ферромагнетик определена как T=0 К. Это означает, что фазовое превращение γ→α (ГЦК→ОЦК) может наблюдаться при указанной температуре и ниже. Выше этой температуры ГЦК решетка стабильна. Другое магнитное превращение парамагнетик/антиферромагнетик происходит при температуре Нееля 230–248 К [22] (расчеты проведены разными методами), однако это превращение никак не связано с перестройкой кристаллической решетки.

В работе [22] получены данные об увеличении параметра решетки аустенита в CrMnCN при увеличении степени деформации при растяжении при комнатной температуре, что также является аномальным деформационным поведением, как и при снижении температуры испытаний. Если при увеличении длины образца одновременно в поперечном направлении происходит увеличение параметра (уширение), что свойственно ауксетикам, обладающим отрицательным коэффициентом Пуассона [23], тогда в процессе деформирования не должна образоваться шейка. Действительно, в работе [16] нами была отмечена особенность деформационного поведения исследуемой стали, заключающаяся в отсутствии локализованной пластичности, то есть шейки. При этом сталь разрушалась вязко с ямочным видом излома. Только при испытаниях при комнатной температуре на кривой σ–ε в инженерных координатах в явном виде проявляется небольшой перегиб предшествующий разрушению (рис. 5 а).

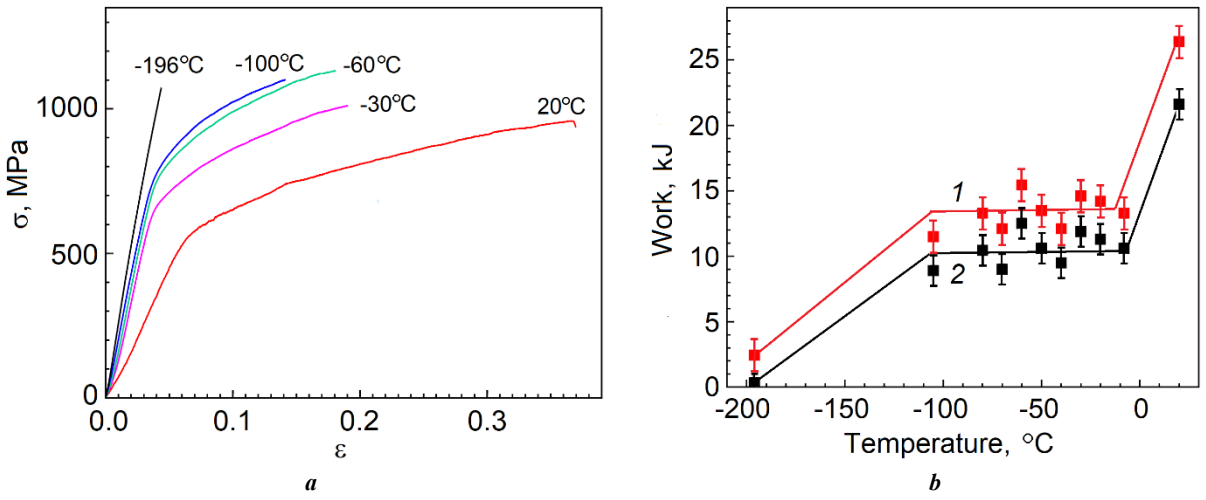


Рис. 5. *Деформационное поведение CrMnCN стали при испытаниях на растяжение при разных температурах [Привод по 16, с. 1039]:*
a *– кривые σ – ε;* ***b*** *– полная работа деформации (1) и отдельно пластической деформации (2)*
Fig. 5. *Deformation behaviour of CrMnCN steel during tensile tests at different temperatures [According to 16, p. 1039]:*
a *– curves σ – ε;* ***b*** *– total deformation work (1) and plastic deformation work separately (2)*

Другой причиной увеличения параметра решетки при испытаниях является деформационно-индуцированное растворение дисперсных фаз при интенсивной пластической деформации (ИПД), исследованное в работах [24; 25]. В предварительно состаренных высокоазотистых сталях после ИПД в наковальнях Бриджмена под высоким давлением и при трении было установлено увеличение содержания азота в твердом растворе за счет растворения нитридов хрома Cr2N. В нашем случае растворение дисперсных оксикарбидных фаз маловероятно, так как, во-первых, они не растворились при 1150 °C, во-вторых, после закалки в воде ГЦК решетка уже является предельно насыщенной легирующими элементами и, в-третьих, схема деформирования растяжением отличается от ИПД низкой скоростью и малой степенью деформации и исключает сколь-нибудь значимый деформационный нагрев.

Наблюдение о локализации деформации при 20 °C перед разрушением согласуется с экспериментальными данными рентгеноструктурного анализа (рис. 2 a). В интервале температур испытаний от −30 до −90 °C параметр решетки деформированных образцов также остается ниже, чем в исходном недеформированном состоянии, однако разница между ними уменьшается с понижением температуры. В деформированном при −196 °C ауксетичность кристаллической решетки проявляется в явном виде: параметр решетки аустенита после испытаний больше, чем в недеформированном образце (в состоянии после закалки) при одинаковых условиях регистрации дифрактограмм.

Работа деформации в интервале температур от −105 до 0 °C, основную часть которой составляет работа пластической деформации, имеет практически постоянные значения (рис. 5 b). Это может означать, что в процессе низкотемпературного деформирования в стали задействованы одинаковые механизмы деформации – скольжение дислокаций и двойникование [22], обеспечивающие удовлетворительную пластичность (10 %) и вязкий характер разрушения [16].

Соотношение работы упругой и пластической деформации изменяется при испытаниях при −196 °C. В этом случае основная доля принадлежит упругой деформации. Чем больше вклад упругой деформации в полную деформацию, тем выше напряжения, формирующиеся при нагружении. Результаты, показанные на рис. 4, свидетельствуют об измельчении структуры до наноразмерной во всем температурном интервале, включая температуру −196 °C при малом вкладе в деформирование пластической составляющей работы деформации. Измельчение структуры стали, обладающей низкой пластичностью при криогенной температуре, возможно при мартенситных превращениях с трансформациями ГЦК решетки в другую или другие типы решеток.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование кристаллической структуры литой нержавеющей CrMnCN стали, выполненное рентгенодифракционными методами при охлаждении и после низкотемпературных испытаний на растяжение выявило следующие особенности:

1. После гомогенизационного отжига стали при 1000 °C, подогрева до 1150 °C и закалки в воде в ней сохраняется дендритное строение с прослойками аустенитной фазы, составляющей основу.

2. При охлаждении стали от комнатной температуры до −190 °C параметр ГЦК решетки уменьшался от 3,6405 Å до 3,6345 Å. В деформированной в том же температурном интервале стали параметр ГЦК решетки наоборот, увеличивался от 3,6364 Å до 3,6446 Å. Увеличение параметра в направлении, перпендикулярном оси растяжения свидетельствует об ауксетичности стали. В явном виде это свойство стали проявилось после испытаний при −196 °C.

3. Концентрация ДУ возрастает как при охлаждении стали, так и при снижении температуры испытаний. При этом в деформированной стали рост концентрации ДУ происходит более интенсивно.

4. После испытаний во всем температурном интервале отмечено измельчение ОКР аустенита до наноразмерной величины. Малая величина ОКР отмеченная после испытаний при криогенной температуре с хрупким разрушением на пределе текучести возможна при мартенситных превращениях с трансформациями ГЦК решетки в другую или другие решетки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhi Wang, Chengyang Hu, Hangyu Dong, Xiangliang Wan, Xiangtao Deng, Rui Ke, Guangqiang Li, Kaiming Wu. Revealing the Synergistic Effects of Grain Refinement and Low Temperature on the Deformation Mechanisms of Cr–Mn–N Austenitic Stainless Steel // Metallurgical and Materials Transactions A. 2025. Vol. 56. P. 2252–2267. DOI: 10.1007/s11661-025-07773-w.
2. Hamada A.S., Karjalainen L.P., Misra R.D.K., Talonen J. Contribution of deformation mechanisms to strength and ductility in two Cr–Mn grade austenitic stainless steels // Materials Science and Engineering: A. 2013. Vol. 559. P. 336–344. DOI: 10.1016/j.msea.2012.08.108.
3. Костина М.В., Ригина Л.Г. Азотсодержащие стали и способы их производства // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 8. С. 606–622. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-8-606-622.
4. Lo K.H., Shek C.H., Lai J.K.L. Recent developments in stainless steels // Materials Science and Engineering: R. 2009. Vol. 65. № 4-6. P. 39–104. DOI: 10.1016/j.mser.2009.03.001.
5. Narkevich N., Deryugin Y., Mironov Yu. Effect of the γ→ε phase transition on transformation-induced plasticity (TRIP) of the nickel-free high nitrogen steel at low temperatures // Metals. 2021. Vol. 11. № 5. Article number 710. DOI: 10.3390/met11050710.
6. Byongchul Hwang, Tae-Ho Lee, Seong-Jun Park, Chang-Seok Oh, Sung-Joon Kim. Correlation of austenite stability and ductile-to-brittle transition behavior of high-nitrogen 18Cr-10Mn austenitic steels // Materials Science and Engineering: A. 2011. Vol. 528. № 24. P. 7257–7266. DOI: 10.1016/j.msea.2011.06.025.
7. Narkevich N., Deryugin Y., Mironov Yu. Effect of the γ→ε phase transition on transformation-induced plasticity (TRIP) of the nickel-free high nitrogen steel at low temperatures // Metals. 2021. Vol. 11. № 5. Article number 710. DOI: 10.3390/met11050710.
8. Терещенко Н.А., Шабашов В.А., Уваров А.И. Особенности низкотемпературных фазовых превращений в азотсодержащих сталях на Cr–Mn основе // Физика металлов и металловедение. 2010. Т. 109. № 5. С. 464–473. EDN: MSQBDT.
9. Hongshan Zhao, Wei Peng, Chun Zheng, Zengwei Fan, Xinqiang Gao, Tinghui Man, Xicheng Wei, Laizhu Jiang, Han Dong. Insights into the impact behavior and deformation substructure evolution of the N-bearing QN1803 and 304 stainless steels // Steel research international. 2023. Vol. 94. № 10. Article number 200508. DOI: 10.1002/srin.202200508.
10. Tanaka M., Onomoto T., Tsuchiyama T., Higashida K. Brittle-to-ductile transition in nickel-free austenitic stainless steels with high nitrogen // ISIJ International. 2012. Vol. 52. № 5. P. 915–921. DOI: 10.2355/isijinternational.52.915.
11. Milititsky M., Matlock D.K., Regully A., Dewispelaere N., Penning J., Hanninen H. Impact toughness properties of nickel-free austenitic stainless steels // Materials Science and Engineering: A. 2008. Vol. 496. № 1-2. P. 189–199. DOI: 10.1016/j.msea.2008.05.022.
12. Jiangcheng Liu, Kai Guo, Haote Ma, Jiangli He, Junchao Wang, Chuanyou Zhang, Tiansheng Wang, Qingfeng Wang. Nitrogen content effects on microstructural evolution and low-temperature impact toughness in the coarse-grained heat-affected zone of welded X70 pipeline steel // Metals. 2026. Vol. 16. № 3. Article number 331. DOI: 10.3390/met16030331.
13. Костина М.В., Кудряшов А.Э., Ригина Л.Г., Мурадян С.О., Антонова О.С., Костина В.С. Хладостойкость новой литейной Cr – Mn – Ni – Mo – N стали. Часть 2. Исследование фактора частиц неметаллических включений при статическом и ударном нагружении при пониженных температурах // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 3. С. 190–199. DOI: 10.17073/0368-0797-2022-3-191-19.
14. Xu M., Wang J., Liu C. Low temperature deformation behavior of high-nitrogen nickel-free austenitic stainless steels // Acta Metallurgica Sinica. 2011. Vol. 47. P. 1335–1341. DOI: 10.3724/SP.J.1037.2011.00141.
15. Narkevich N., Vlasov I., Volochaev M., Gomorova Y., Mironov Y., Panin S., Berto F., Maksimov P., Deryugin E. Low-Temperature Deformation and Fracture of Cr-Mn-N Stainless Steel: Tensile and Impact Bending Tests // Metals. 2023. Vol. 13. № 1. Article number 95. DOI: 10.3390/met13010095.
16. Narkevich N.A., Mironov Yu.P., Badulin N.V. Influence of Negative Temperatures on Crystal Structure, Properties, and Fracture of Cr–Mn–C–N Steel // Physics of Metals and Metallography. 2024. Vol. 125. № 9. P. 1035–1042. DOI: 10.1134/S0031918X2460146X.
17. Tomota Y., Xia Y., Inoue K. Mechanism of low temperature brittle fracture in high nitrogen bearing austenitic steels // Acta Materialia. 1998. Vol. 46. № 5. P. 1577–1587. DOI: 10.1016/S1359-6454(97)00350-9.
18. Byoung Chul Hwang, Tae Ho Lee, Seong Jun Park, Chang Seok Oh, Sung Joon Kim. Ductile to-brittle transition behavior of high-nitrogen 18Cr-10Mn-0.35N austenitic steels containing Ni and Cu // Materials Science Forum. 2010. Vol. 654-656. P. 158–161. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.158.
19. Narkevich N.A., Khimich M.A., Kalashnikov M.P., Gomorova Y.F., Vlasov I.V., Slobodyan M.S., Badulin N.V. Structure and properties of high interstitial as-cast austenitic stainless steel CrMnCN for use at subzero temperatures // Letters on materials. 2024. Vol. 14. № 4. P. 365–371. DOI: 10.48612/letters/2024-4-365-371.
20. Altuntas G., Bostan B., Altuntas O. Evaluation of the effect of shallow cryogenic treatment on tribological properties and microstructure of high manganese steel // International Journal of Metalcasting. 2023. Vol. 18. № 2. P. 1523–1534. DOI: 10.1007/s40962-023-01131-5.
21. Gavriljuk V.G., Sozinov A.L., Foct J., Petrov Ju.N., Polushkin Yu.A. Effect of nitrogen on the temperature dependence of the yield strength of austenitic steels //

Acta Materialia. 1998. Vol. 46. № 4. P. 1157–1163. DOI: 10.1016/S1359-6454(97)00322-4.
22. Torres-Meji´a L.G., Paredes-Gil K., Parra Vargas C.A., Lentz J., Weber S., Mujica-Roncery L. Effect of Deformation on the Magnetic Properties of C + N Austenitic Steel // Metallurgical and Materials Transactions A. 2024. Vol. 55. P. 150–160. DOI: 10.1007/s11661-023-07237-z.
23. Goldstein R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S. Classification of cubic auxetics // Physica Status Solidi B. 2013. Vol. 1-6. № 10. P. 2038–2043. DOI: 10.1002/pssb.201384233.
24. Шабашов В.А., Коршунов Л.Г., Сагарадзе В.В., Катаева Н.В., Заматовский А.Е., Литвинов А.В., Ляшков К.А. Распределение азота в высокоазотистой хромомарганцевой аустенитной стали при фрикционном воздействии и сдвиге под давлением // Физика металлов и металловедение. 2013. Т. 114. № 8. С. 741–752. DOI: 10.7868/S0015323013080093.
25. Shabashov V., Lyashkov K., Kozlov K., Zavalishin V., Zamatovskii A., Kataeva N., Sagaradze V., Ustyugov Y. Critical Redistribution of Nitrogen in the Austenitic Cr-Mn Steel under Severe Plastic Deformation // Materials. 2021. Vol. 14. № 23. Article number 7116. DOI: 10.3390/ma14237116.

REFERENCES

1. Zhi Wang, Chengyang Hu, Hangyu Dong, Xiangliang Wan, Xiangtao Deng, Rui Ke, Guangqiang Li, Kaiming Wu. Revealing the Synergistic Effects of Grain Refinement and Low Temperature on the Deformation Mechanisms of Cr–Mn–N Austenitic Stainless Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2025, vol. 56, pp. 2252–2267. DOI: 10.1007/s11661-025-07773-w.
2. Hamada A.S., Karjalainen L.P., Misra R.D.K., Talonen J. Contribution of deformation mechanisms to strength and ductility in two Cr–Mn grade austenitic stainless steels. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, vol. 559, pp. 336–344. DOI: 10.1016/j.msea.2012.08.108.
3. Kostina M.V., Rigina L.G. Nitrogen-containing steels and methods of their production. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2020, vol. 63, no. 8, pp. 606–622. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-8-606-622.
4. Lo K.H., Shek C.H., Lai J.K.L. Recent developments in stainless steels. *Materials Science and Engineering: R*, 2009, vol. 65, no. 4-6, pp. 39–104. DOI: 10.1016/j.mser.2009.03.001.
5. Narkevich N., Deryugin Y., Mironov Yu. Effect of the γ→ε phase transition on transformation-induced plasticity (TRIP) of the nickel-free high nitrogen steel at low temperatures. Metals, 2021, vol. 11, no. 5, article number 710. DOI: 10.3390/met11050710.
6. Byongchul Hwang, Tae-Ho Lee, Seong-Jun Park, Chang-Seok Oh, Sung-Joon Kim. Correlation of austenite stability and ductile-to-brittle transition behavior of high-nitrogen 18Cr-10Mn austenitic steels. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 528, no. 24, pp. 7257–7266. DOI: 10.1016/j.msea.2011.06.025.
7. Narkevich N., Deryugin Y., Mironov Yu. Effect of the γ→ε phase transition on transformation-induced plasticity (TRIP) of the nickel-free high nitrogen steel at low temperatures. Metals, 2021, vol. 11, no. 5, article number 710. DOI: 10.3390/met11050710.
8. Tereshchenko N.A., Shabashov V.A., Uvarov A.I. Specific features of low-temperature phase transformations in nitrogen-containing Cr-Mn-based steels. *Physics of Metals and Metallography*, 2010, vol. 109, no. 5, pp. 427–437. DOI: 10.1134/S0031918X10050030.
9. Hongshan Zhao, Wei Peng, Chun Zheng, Zengwei Fan, Xinqiang Gao, Tinghui Man, Xicheng Wei, Laizhu Jiang, Han Dong. Insights into the impact behavior and deformation substructure evolution of the N-bearing QN1803 and 304 stainless steels. *Steel research international*, 2023, vol. 94, no. 10, article number 200508. DOI: 10.1002/srin.202200508.
10. Tanaka M., Onomoto T., Tsuchiyama T., Higashida K. Brittle-to-ductile transition in nickel-free austenitic stainless steels with high nitrogen. *ISIJ International*, 2012, vol. 52, no. 5, pp. 915–921. DOI: 10.2355/isijinternational.52.915.
11. Milititsky M., Matlock D.K., Regully A., Dewispelaere N., Penning J., Hanninen H. Impact toughness properties of nickel-free austenitic stainless steels. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 496, no. 1-2, pp. 189–199. DOI: 10.1016/j.msea.2008.05.022.
12. Jiangcheng Liu, Kai Guo, Haote Ma, Jiangli He, Junchao Wang, Chuanyou Zhang, Tiansheng Wang, Qingfeng Wang. Nitrogen content effects on microstructural evolution and low-temperature impact toughness in the coarse-grained heat-affected zone of welded X70 pipeline steel. *Metals*, 2026, vol. 16, no. 3, article number 331. DOI: 10.3390/met16030331.
13. Kostina M.V., Kudryashov A.E., Rigina L.G., Muradyan S.O., Antonova O.S., Kostina V.S. Cold resistance of new casting Cr-Mn-Ni-Mo-N steel. Part 2. Investigation of the factor of non-metallic inclusions particles under static and impact loading at low temperatures. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2022, vol. 65, no. 3, pp. 190–199. DOI: 10.17073/0368-0797-2022-3-191-19.
14. Xu M., Wang J., Liu C. Low temperature deformation behavior of high-nitrogen nickel-free austenitic stainless steels. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011, vol. 47, pp. 1335–1341. DOI: 10.3724/SP.J.1037.2011.00141.
15. Narkevich N., Vlasov I., Volochaev M., Gomorova Y., Mironov Y., Panin S., Berto F., Maksimov P., Deryugin E. Low-Temperature Deformation and Fracture of Cr-Mn-N Stainless Steel: Tensile and Impact Bending Tests. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 1, article number 95. DOI: 10.3390/met13010095.
16. Narkevich N.A., Mironov Yu.P., Badulin N.V. Influence of Negative Temperatures on Crystal Structure, Properties, and Fracture of Cr–Mn–C–N Steel. *Physics of Metals and Metallography*, 2024, vol. 125, no. 9, pp. 1035–1042. DOI: 10.1134/S0031918X2460146X.
17. Tomota Y., Xia Y., Inoue K. Mechanism of low temperature brittle fracture in high nitrogen bearing austenitic steels. *Acta Materialia*, 1998, vol. 46, no. 5, pp. 1577–1587. DOI: 10.1016/S1359-6454(97)00350-9.
18. Byoung Chul Hwang, Tae Ho Lee, Seong Jun Park, Chang Seok Oh, Sung Joon Kim. Ductile to-brittle transition behavior of high-nitrogen 18Cr-10Mn-0.35N austenitic steels containing Ni and Cu. *Materials Science Forum*, 2010, vol. 654-656, pp. 158–161. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.158.
19. Narkevich N.A., Khimich M.A., Kalashnikov M.P., Gomorova Y.F., Vlasov I.V., Slobodyan M.S., Badulin N.V. Structure and properties of high interstitial as-cast

austenitic stainless steel CrMnCN for use at subzero temperatures. *Letters on materials*, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 365–371. DOI: 10.48612/letters/2024-4-365-371.
20. Altuntas G., Bostan B., Altuntas O. Evaluation of the effect of shallow cryogenic treatment on tribological properties and microstructure of high manganese steel. *International Journal of Metalcasting*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 1523–1534. DOI: 10.1007/s40962-023-01131-5.
21. Gavriljuk V.G., Sozinov A.L., Foct J., Petrov Ju.N., Polushkin Yu.A. Effect of nitrogen on the temperature dependence of the yield strength of austenitic steels. *Acta Materialia*, 1998, vol. 46, no. 4, pp. 1157–1163. DOI: 10.1016/S1359-6454(97)00322-4.
22. Torres-Meji´a L.G., Paredes-Gil K., Parra Vargas C.A., Lentz J., Weber S., Mujica-Roncery L. Effect of Deformation on the Magnetic Properties of C + N Austenitic Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2024, vol. 55, pp. 150–160. DOI: 10.1007/s11661-023-07237-z.
23. Goldstein R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S. Classification of cubic auxetics. *Physica Status Solidi B*, 2013, vol. 1-6, no. 10, pp. 2038–2043. DOI: 10.1002/pssb.201384233.
24. Shabashov V.A., Korshunov L.G., Sagaradze V.V., Kataeva N.V., Zamatovskii A.E., Litvinov A.V., Lyashkov K.A. Nitrogen distribution in austenitic high-nitrogen chromium-manganese steel under friction and high-pressure torsion. *Physics of Metals and Metallography*, 2013, vol. 114, no. 8, pp. 681–691. DOI: 10.1134/S0031918X13080097.
25. Shabashov V., Lyashkov K., Kozlov K., Zavalishin V., Zamatovskii A., Kataeva N., Sagaradze V., Ustyugov Y. Critical Redistribution of Nitrogen in the Austenitic Cr-Mn Steel under Severe Plastic Deformation. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 23, article number 7116. DOI: 10.3390/ma14237116.

UDC 548.73:66-974:620.172.251.1
doi: https://doi.org/10.18323/2782-4039-2026-2-76-5

Features of the crystal structure of cast CrMnCN stainless steel before and after low-temperature deformation

Natalya A. Narkevich*[1,3], PhD (Engineering), Associate Professor, senior researcher
Nikita Badulin[1,2,4], research assistant, student
Ilya V. Vlasov[1,5], PhD (Engineering), researcher
[1]*Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS, Tomsk, Russia*
[2]*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

***E-mail:** natnark@list.ru

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5179-1955
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2792-7658
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9110-8313

Received 30.06.2025 *Revised 09.07.2025* *Accepted 02.06.2026*

Abstract: **Problem.** Cold-resistant chromium-nickel stainless steels possess low strength properties. Their replacement requires using steels with enhanced strength characteristics and lower cost. Steels alloyed with nitrogen and carbon meet these requirements; however, their crystal structure at low temperatures has been insufficiently studied. **Aim.** To determine the influence of low temperatures and low-temperature deformation on the crystal structure parameters of a nickel-free austenitic steel with a high content of interstitial elements. **Methods.** The crystal structure of cast CrMnCN steel with a (C+N) content of 1.27 wt. % was investigated by X-ray diffraction methods in the temperature range from −190 to 20 °C. The steel was preliminarily homogenised at 1000 °C, then heated to 1150 °C and quenched in water. Tensile tests were carried out at temperatures from −196 to 20 °C. After testing, the crystal structure was analysed. **Results.** After quenching, the dendritic structure of the steel consists of austenite with a lattice parameter a=3.6405 Å and clusters of dispersed particles. Upon cooling of the steel, the FCC lattice parameter decreased, while in specimens tested in tension, it increased as the test temperature decreased. At cryogenic test temperatures, the crystal lattice exhibits auxetic behaviour. During cooling and low-temperature deformation, stacking faults (SFs) form in the steel. After testing at −196 °C, the SF concentration is twice as high as in steel cooled to the same temperature. The combination of low ductility of the steel at −196 °C, a small amount of plastic deformation work, and a high dispersion of coherent scattering regions (CSRs) indicates the onset of martensitic transformations. **Conclusions.** Upon cooling of the steel, the lattice parameter decreases. Conversely, during low-temperature deformation, the FCC lattice parameter increases, and at −196 °C the steel exhibits auxetic behaviour. A feature of the response of the crystal structure to low-temperature deformation is an increase in the SF concentration and a small CSR size.

Keywords: cast steel; quenching; austenite; low temperatures; tensile testing; auxetic; stacking fault; microstrains

Acknowledgements: The study was financially supported by the Russian Science Foundation within the framework of scientific project No. 25-29-00027. Diffractometric studies were carried out using the equipment of the “Nanotech” Shared

Research Center of the Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISPMS SB RAS).

The paper was written on the reports of the participants of the XII International School of Physical Materials Science (SPM-2025), Togliatti, September 15–19, 2025.

For citation: Narkevich N.A., Badulin N., Vlasov I.V., Features of the crystal structure of cast CrMnCN stainless steel before and after low-temperature deformation. *Frontier Materials & Technologies*, 2026, no. 2, pp. 55–64. DOI: https://doi.org/10.18323/2782-4039-2026-2-76-5.