

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 67.02

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-94-101



ОЦЕНКА УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ, ХЛАДОСТОЙКОСТИ И СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 20, АРМИРОВАННОЙ СТАЛЬЮ 12Х18Н10Т МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

Колчин П.В.¹, Костылев К.А.¹, Чернигин М.А.²

¹ Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Современное развитие аддитивных технологий позволяет создавать новые композиционные материалы с более высокими характеристиками, состоящие из двух и более различных сплавов. Это открывает возможности по изготовлению оборудования и конструкций, более стойких к экстремальным условиям эксплуатации, таким как низкие температуры Крайнего севера и Арктики. В данной статье проведена оценка хладостойкости материала, состоящего из стали 20, который армирован сталью 12Х18Н10Т с целью образования участков вязкого разрушения при хрупком разрушении основного материала в условиях низких температур. Для достижения поставленной цели и задач были изготовлены биметаллические образцы, где второй материал наносился методом лазерной наплавки проволоки и расположен в виде полос по трем сторонам на поверхности образцов. В работе применялись методы испытания на ударный изгиб, микроструктурного и фрактографического анализа. Результаты показывают, что армирование стали с ОЦК-решеткой сплавом с ГЦК-решеткой аддитивным методом лазерной наплавки позволяет сохранить в изломе образцов вязкую составляющую на уровне 9% поперечного сечения образца при выбранной плотности армирования, что увеличивает ударную вязкость в 2,2 раза при температуре испытания -50°C . Однако ввиду разницы в свойствах материалов при разрушении действуют напряжения, снижающие ударную вязкость при нормальной температуре. В связи этим возникает потребность в выработке методов по снижению данного негативного влияния за счет подбора более эффективной схемы армирования, термической обработки, методов компьютерного моделирования и сочетания материалов.

Ключевые слова: хладостойкость, мультиметаллические материалы, аддитивные технологии, лазерная наплавка, армирование

Исследование выполнено в рамках государственного задания Центра гидроакустики ИПФ РАН, тема FFUF-2024-0040 «Разработка физических принципов перспективных акустических систем».

© Колчин П.В., Костылев К.А., Чернигин М.А., 2025

Для цитирования

Колчин П.В., Костылев К.А., Чернигин М.А. Оценка ударной вязкости, хладостойкости и структуры углеродистой стали 20, армированной сталью 12Х18Н10Т методом лазерной наплавки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 94-101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-94-101>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ASSESSMENT OF IMPACT TOUGHNESS, COLD RESISTANCE AND STRUCTURE OF CARBON STEEL 20, REINFORCED WITH 12CR18NI10TI STEEL BY LASER CLADDING METHOD

Kolchin P.V.¹, Kostylev K.A.¹, Chernigin M.A.²

¹ Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

² Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Modern development of additive technologies allows for creation new composite materials with higher characteristics, consisting of two or more different alloys. This opens up opportunities for manufacturing equipment and structures that are more resistant to extreme operating conditions, such as low temperatures of the Far North and the Arctic. This article assesses the cold resistance of a material consisting of steel 20, which is reinforced with steel 12Cr18Ni10Ti in order to form areas of viscous fracture during brittle fracture of the base material at low temperatures. To achieve the stated objectives, bimetallic samples were manufactured, where the second material was applied by laser wire cladding and located in the form of stripes on three sides of the samples surface. The authors used the methods of impact bending testing, microstructural and fractographic analysis. The results show that reinforcement of BCC steel with FCC alloy by additive laser cladding method allows for preserving viscous component in fracture of samples at the level of 9% of cross-section of sample, at the selected reinforcement density, which increases impact toughness by 2.2 times at test temperature of -50°C . However, due to difference in properties of materials, there are stresses during destruction, which reduce impact toughness at normal temperature. In this regards, there is a need to develop methods for reduction of this negative influence by means of selection of more effective reinforcement scheme, heat treatment, methods of computer modeling and combination of materials.

Keywords: cold resistance, multi-metallic materials, additive technologies, laser cladding, reinforcement.

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Center for Hydroacoustics of the IAP RAS, topic FFUF-2024-0040 "Development of physical principles of advanced acoustic systems".

For citation

Kolchin P.V., Kostylev K.A., Chernigin M.A. Assessment of Impact Toughness, Cold Resistance and Structure of Carbon Steel 20, Reinforced with 12Cr18Ni10Ti Steel by Laser Cladding Method. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 94-101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-94-101>

Введение

Арктика и Северный Ледовитый океан представляют собой стратегически важные территории для России. Регион обладает огромным потенциалом благодаря своим природным ресурсам и возможностям в качестве логистического коридора между Европой и Азией. В связи с этим государство активно развивает инфраструктуру этих территорий, что отражено в документах, таких как «Стратегия развития Арктической зоны России до 2035 года». Однако освоение арктических регионов сопряжено с рядом технических и климатических вызовов. Одной из ключевых проблем является экстремально низкая температура окружающей среды, которая может достигать -60°C и ниже. Для обеспечения надежности конструкций и оборудования в таких условиях требуется особое внимание к выбору хладостойких материалов [1].

Под хладостойкостью понимается способность металлов сохранять свои механические свойства, такие как вязкость и пластичность, при температурах от 0 до -269°C [1]. Исследования показывают, что при снижении температуры механизм разрушения метал-

лов может изменяться. Например, работы А.Ф. Иоффе, посвященные влиянию низких температур на свойства металлов, выявили закономерности в поведении материалов и предложили объяснение механизма вязко-хрупкого перехода (рис. 1). Данные исследования были развиты в дальнейших работах Н.Н. Давиденкова и Я.Б. Фридмана [2].

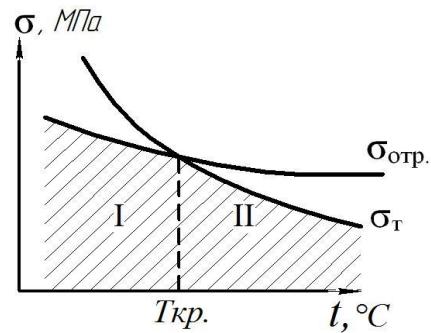


Рис. 1. Модель А.Ф. Иоффе хрупкого (I) и вязкого (II) разрушений стали

Fig. 1. A.F. Ioffe's model of brittle (I) and ductile (II) fractures of steel

Согласно модели А.Ф. Иоффе, снижение температуры оказывает относительно небольшое влияние на сопротивление отрыву, однако существенно меняет предел текучести. Это приводит к смене механизма разрушения материала. Критическая точка пересечения кривых σ_t и $\sigma_{\text{отр}}$ определяет температуру вязко-хрупкого перехода $T_{\text{кр}}$. При температурах ниже $T_{\text{кр}}$ разрушения становятся хрупкими [6].

Экспериментальные исследования [3–8] показали, что различия в кристаллическом строении металлов существенно влияют на их поведение при снижении температуры. Металлы с гранецентрированной кристаллической решеткой (ГЦК) сохраняют вязкий механизм разрушения даже при низких температурах, хотя их ударная вязкость плавно снижается. В свою очередь, металлы с объемно-центрированной кристаллической решеткой (ОЦК) демонстрируют более сложное поведение: после определенной температуры в изломах могут появляться зоны хрупкого разрушения, а при дальнейшем снижении температуры материал полностью охрупчивается [9]. Охрупчивание представляет серьезную опасность, так как трещины распространяются быстро, не давая возможности своевременно выявить проблему и принять меры для предотвращения разрушения конструкции и, соответственно, аварии.

Для оценки хладостойкости материалов используются две основные характеристики: температура вязко-хрупкого перехода T_{50} и температура, при которой ударная вязкость KCV достигает критического значения 20 Дж/см². Температура T_{50} определяется как температура, при которой доля вязкой и хрупкой составляющих в изломе равна 50 %. Чем ниже значение T_{50} , тем выше хладостойкость материала. Аналогично чем ниже температура, при которой достигается критическое значение KCV, тем более хладостойким считается металл [10].

На сегодняшний день существует несколько методов повышения хладостойкости металлов. Наиболее распространены следующие подходы: использование металлов с ГЦК-решеткой, легирование и микролегирование, рафинирование и раскисление, применение термической или термомеханической обработки, а также оптимизация конструктивных решений [11, 12]. Эти методы направлены либо на полное исключение хрупкого разрушения при заданной температуре, либо на увеличение доли вязкой составляющей в изломе, что позволяет сдвинуть температуру полного перехода металла из вязкого состояния в хрупкое за пределы эксплуатационных условий.

С развитием современных технологий производства материалов появились новые способы создания биметаллических и мультиметаллических композиций. К таким технологиям относятся селективное лазерное сплавление, электродуговая наплавка порошков и проволоки [13]. Благодаря этим методам стало возможным производить изделия, где основной металл армируется вторым материалом, что значи-

тельно повышает их эксплуатационные характеристики [14, 15]. Особый интерес представляет оценка хладостойкости металлических композиций, содержащих основной металл с ОЦК-решеткой и дополнительное армирование металлом с ГЦК-решеткой.

Преимущество такой композиции заключается в том, что биметаллический материал никогда полностью не переходит из вязкого состояния в хрупкое, поскольку всегда содержит определенный процент металла с ГЦК-решеткой, сохраняющего свою вязкость на всем диапазоне температур. Процентное содержание каждого из металлов в сечении можно регулировать в зависимости от требуемых характеристик в каждом конкретном случае.

Материалы и методы исследования

В качестве основного материала для изготовления образцов была выбрана углеродистая сталь 20 с ОЦК-решеткой. Для армирующего материала использована austenитная нержавеющая сталь 12X18H10T с ГЦК-решеткой. Химический состав этих сталей представлен в табл. 1.

Сталь 20 широко применяется в машиностроении для производства деталей машин и металлоконструкций благодаря своей хорошей свариваемости, что является ключевым фактором при создании биметаллических образцов. Сталь 12X18H10T представляет собой высоколегированный austenитный сплав, который характеризуется высокой коррозионной стойкостью и относится к классу криогенных материалов. Ее допустимый температурный диапазон эксплуатации составляет от –196 до +600 °C [16].

Таблица 1. Химический состав сталей
Table 1. Chemical composition of steels

Сталь 20								
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	
0,17– 0,24	0,17– 0,37	0,35– 0,65	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,3	
Сталь 12X18H10T								
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti
до 0,12	до 0,8	до 2	9–11	до 0,02	до 0,035	17–19	до 0,3	0,6– 0,8

Для оценки влияния низких температур на механические свойства образцов проводились испытания на ударный изгиб согласно ГОСТ 9454-78. Испытания выполнялись на образцах с поперечным сечением 10×10 мм и V-образным надрезом на маятниковом копре РН-300 при температурах +20 и –50°C. Нижнее значение температуры было выбрано для обеспечения полного хрупкого разрушения стали 20.

Для сравнительного анализа были изготовлены два типа образцов: монометаллический (из стали 20) и биметаллический (основа из стали 20 с продольным армированием сталью 12X18H10T). Конструкция заготовки биметаллического образца представлена на рис. 2.

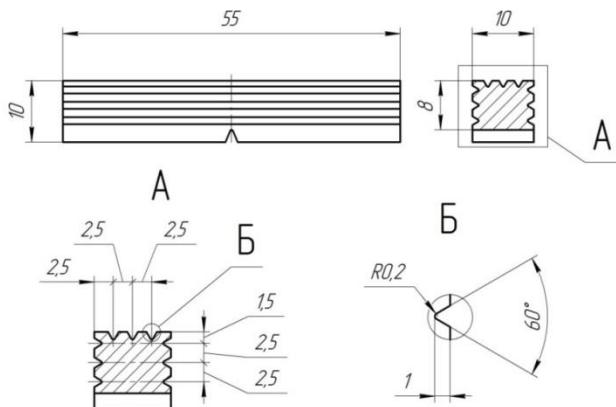
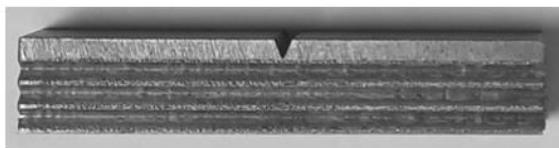


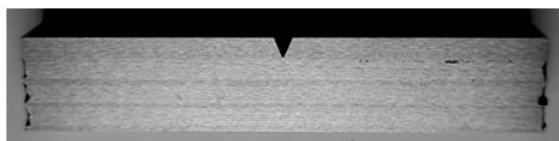
Рис. 2. Эскиз заготовки биметаллического образца
Fig. 2. Sketch of a bimetallic sample blank

Процесс изготовления биметаллических образцов включает следующие этапы:

- Механическая обработка заготовки из стали 20 с вырезанием треугольных канавок (рис. 3, а).
- Послойное заполнение канавок сталью 12Х18Н10Т методом лазерной наплавки проволоки диаметром 0,5 мм на оборудовании НТФ СОМВОМАХ 300/3000. Режимы наплавки: мощность импульса 270 Вт, длительность импульса 4,5 мс, размер пятна 0,96 мм, скорость 1 мм/с, шаг импульса 0,167 мм, защитная атмосфера – аргон.
- Чистовая механическая обработка готовых образцов (рис. 3, б).



а



б

Рис. 3. Изготовление биметаллического образца:
а – заготовка; б – готовый образец после
наплавки

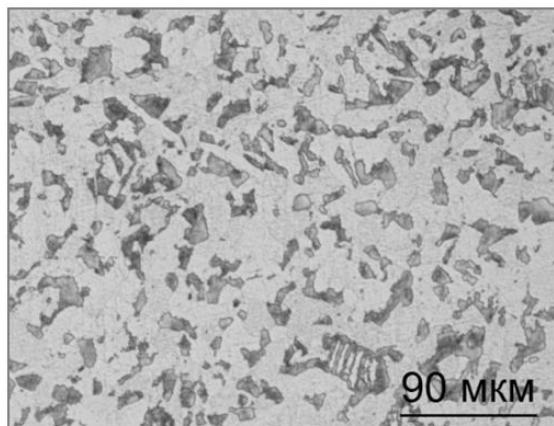
Fig. 3. Manufacturing of a bimetallic sample: a is blank;
б is finished sample after cladding

Доля стали 12Х18Н10Т в поперечном сечении образца составляет 9,05%. В массовом соотношении при средней массе образца 42,8 г масса армирующего материала равна 4,7 г, что соответствует 10,9% от общей массы образца.

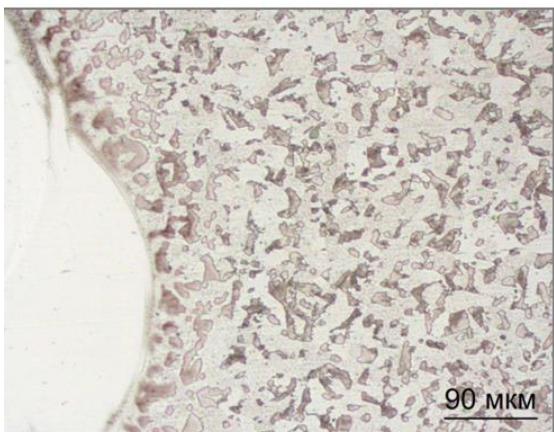
Анализ микроструктуры материала выполнен с использованием металлургического микроскопа модели Альтами МЕТ 1С.

Полученные результаты и их обсуждение

Структура поперечного сечения биметаллического образца представлена на рис. 4. Травление выполнено по стали 20. На изображении видно, что материал имеет ферритно-перлитную структуру, при этом средний размер зерен феррита составляет 16 мкм. В местах сплавления стали 20 со сталью 12Х18Н10Т наблюдаются локальные участки наслоения двух материалов. При этом трещины или отслоения сплавов не выявлены. Имеющиеся особенности строения характерны для изделий, получаемых аддитивным методом лазерного сплавления и наплавки [17, 18].



а



б

Рис. 4. Структура образца в поперечном сечении:
а – структура стали 20, увеличение $\times 200$;
б – структура в зоне сплавления стали 20
и 12Х18Н10Т, увеличение $\times 200$

Fig. 4. Sample structure in cross section: a is structure of steel 20, magnification $\times 200$; б is structure in the fusion zone of steel 20 and 12Cr18Ni10Ti, magnification $\times 200$

Значения ударной вязкости для различных типов образцов представлены в табл. 2.

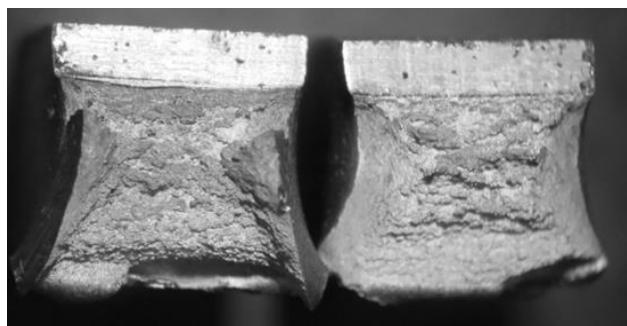
Таблица 2. Значения ударной вязкости образцов
Table 2. Impact toughness values of samples

Образец	KCV(+20°C), Дж/ см ²	KCV(-50°C), Дж/ см ²
Сталь 20	198,19	4,75
Сталь 20 + 12X18H10T	130,31	10,56

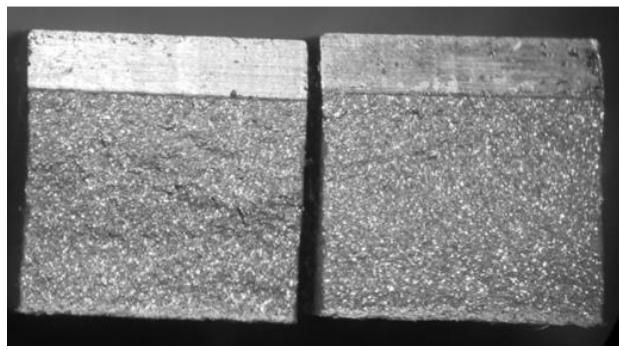
Результаты испытаний показывают следующее:

– При температуре +20°C сталь 20 демонстрирует вязкий механизм разрушения с характерным матовым волокнистым изломом и выраженной пластической деформацией образца (рис. 5, а). Величина KCV составляет 198,19 Дж/см².

– При температуре -50°C сталь 20 разрушается по хрупкой схеме (рис. 5, б). Область разрушения имеет 100%-й хрупкий излом, отличающийся блеском, ручистым узором и фасетками скола. Образец практически не деформируется. Величина KCV составляет 4,75 Дж/см².



а



б

Рис. 5. Изломы стали 20: а – излом при температуре +20°C; б – излом при температуре -50°C

Fig. 5. Fractures of steel 20: a is fracture at temperature +20°C; b is fracture at temperature -50°C

При испытании биметаллических образцов наблюдаются различия во внешнем виде изломов и величине KCV по сравнению с образцами из стали

20. Биметаллический образец имеет меньшую степень пластической деформации. Поверхность излома на рис. 6, а представляет собой две области: вязкого разрушения по контуру образца, включающая как основной, так и армирующий материалы; хрупкого разрушения в сердцевине образца, состоящая только из основного материала.

На рис. 6, в видно, что хрупкая зона может представлять собой не единый участок, а ряд областей, между которыми наблюдаются вязкие разрушения. Доля хрупкой составляющей в биметаллических образцах составляет в среднем 26%. Образец имеет все характерные зоны для вязкого разрушения, включая зарождение трещины, распространение трещины, утяжки и долома. Значение ударной вязкости KCV (+20°C) составляет 130,3 Дж/см².

Твердость стали 20 в сердцевине биметаллических образцов составляет 108 НВ, что указывает на отсутствие увеличения её твердости вследствие многократных термических воздействий в процессе наплавки. Охрупчивание нельзя связать с температурным фактором, поскольку при +20°C аналогичные образцы без наплавки разрушаются по вязкой схеме. Поведение биметаллического материала можно объяснить сочетанием нескольких факторов: внутренними напряжениями, вызванными наплавкой, разностью в механических свойствах двух материалов и скоростью деформации при испытаниях [19–21].

При испытании биметаллических образцов в зоне надреза разрушение происходит по вязкой схеме. По мере развития разрушения в сторону сердцевины включаются зоны с наплавкой из стали 12X18H10T, которые препятствуют пластической деформации стали 20, удерживают области основного материала у поверхности и не дают им переместиться к центру. Это создает напряженное состояние в центральной области образца, где изменение формы меньше, чем изменение объема при деформации, что соответствует условию образования областей хрупкого разрушения. По мере прохождения центральной области напряжения в материале уменьшаются, и разрушение завершается по вязкой схеме.

При испытании биметаллических образцов при температуре -50°C основной материал разрушается по хрупкой схеме аналогично образцам из стали 20 без армирования. Участки излома, заполненные армирующим сплавом, имеют матовую поверхность и признаки пластической деформации. Армирующие полосы на тыльной поверхности образца имеют зону долома (рис. 6, б, г). Таким образом, зоны хрупкого и вязкого разрушения разделены между сталью 20 и сталью 12X18H10T соответственно. Средняя величина ударной вязкости KCV (-50°C) составляет 10,56 Дж/см².

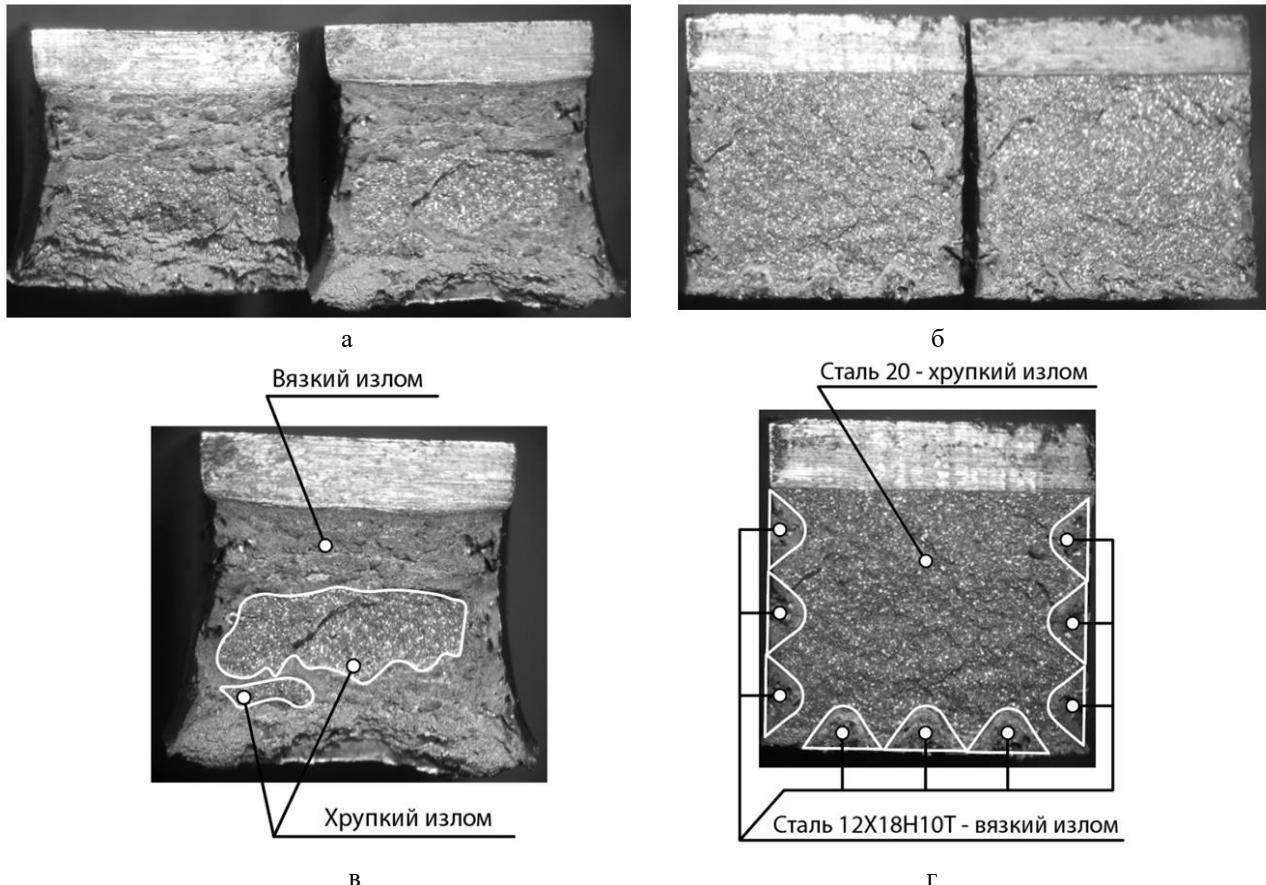


Рис. 6. Изломы стали 20 с наплавкой стали 12Х18Н10Т: а – излом при температуре +20°C; б – излом при температуре -50°C; в – излом при температуре +20°C с указанием областей хрупкого и вязкого разрушения; г – излом при температуре -50°C с указанием областей хрупкого и вязкого разрушения

Fig. 6. Fractures of steel 20 with 12Cr18Ni10Ti steel cladding: a is fracture at a temperature of +20°C; б is fracture at a temperature of -50°C; в is fracture at a temperature of +20°C with an indication of the areas of brittle and ductile fracture; г is fracture at a temperature of -50°C with an indication of the areas of brittle and ductile fracture

Заключение

По результатам проведенного исследования установлено, что армирование стали 20 наплавкой из стали 12Х18Н10Т, занимающей 9% поперечного сечения образца, увеличивает ударную вязкость биметаллических образцов в 2,2 раза при температуре -50 °C по сравнению с образцами из стали 20 без наплавки.

При этом наблюдается снижение значения ударной вязкости биметаллических образцов на 34% при температуре +20 °C по сравнению с образцами из стали 20. Данное снижение связано с появлением хрупкой составляющей в изломе, что обусловлено внутренними напряжениями в основном материале, возникающими в результате наплавки армирующего материала, а также различием в механических свойствах сталей 20 и 12Х18Н10Т.

Для дальнейшего повышения характеристик биметаллических образцов требуется реализация дополнительных мероприятий по устранению внутрен-

них напряжений. В качестве возможных решений могут быть применены:

- комплексная термическая обработка для снятия остаточных напряжений;
- оптимизация конфигурации и плотности армирующей сетки из сплавов с ГЦК-решеткой;
- использование методов математического моделирования (например, метод конечных элементов – МКЭ) и топологической оптимизации для обеспечения большей стойкости к хрупкому разрушению в направлении прикладываемых нагрузок.

Таким образом, полученные результаты подтверждают эффективность применения биметаллических композитов для создания конструкций, работающих в условиях низких температур, однако требуют дальнейшей оптимизации технологических параметров их изготовления.

Список источников

1. Солнцев Ю.П. Современные и перспективные стали криогенной техники // Перспективные материалы. 1998. № 3. С. 68–81.
2. Металловедение. Сталь: справочник в 2-х томах (четырех книгах): пер. с нем. М.: Металлургия, 1995. 399 с.
3. Лебедев Д.В. Конструктивная прочность криогенных сталей. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
4. Солнцев Ю.П. Хладостойкие стали и сплавы: учебник для вузов. СПб.: Химиздат, 2014. 476 с.
5. Ульянин Е.А., Сорокина Н.А. Стали и сплавы для криогенной техники: справочник. М.: Металлургия, 1984. 206 с.
6. Вигли Д.А. Механические свойства материалов при низких температурах / пер. с англ. В. Н. Геминова; под ред. [и с предисл.] Л.К. Гордиенко. М.: Мир, 1974. 373 с.: ил.
7. Береснев Г.А. Факторы, влияющие на склонность стали к хрупкому разрушению // Проблемы металловедения и физики металлов: сб. тр. М.: Металлургия, 1968. № 9. С. 157–162.
8. Спектор Я.Я., Саррак В.И., Энтинг Р.И. О причинах влияния никеля на хладноломкость железа // ДАН СССР. 1964. Т. 155. № 5. С. 156–157.
9. Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Фирстов С.А. Физические основы прочности тугоплавких металлов. К.: Наукова думка, 1975. 296 с.
10. Вологжанина С.А., Иголкин А.Ф. Хладостойкие материалы. Лабораторные работы: учеб.-метод. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 42 с.
11. Константинов В.М., Галимский А.И., Хина Б.Б. Анализ путей повышения хладостойкости ряда углеродистых и низколегированных конструкционных сталей // Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. Минск: БНТУ, 2015. Вып. 36. С. 177–185.
12. Гурин М. А., Шафрай К. А. Особенности увеличения хладостойкости металлических сооружений // E-Scio. 2019. №8 (35). С. 186–194.
13. A Review of the Metal Additive Manufacturing Processes / Tebianian M., Aghaie S., Razavi Jafari N.S., Elmi Hosseini S.R., Pereira A.B., Fernandes F.A.O., Farbakhti M., Chen C., Huo Y. // Materials. 2023, 16, 7514. <https://doi.org/10.3390/ma16247514>
14. Review on additive hybrid- and multi-material-manufacturing of metals by powder bed fusion: state of technology and development potential / Schneck M., Horn M., Schmitt M. et al. // Prog Addit Manuf. 2021, 6, 881–894. <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00205-2>
15. Additive manufacturing of multi-material parts—Design guidelines for manufacturing of 316L/CuCrZr in laser powder bed fusion / Meyer Ina, Marcus Oel, Tobias Ehlers, Roland Lachmayer // Heliyon. 2023, 9, no. 8.
16. Вологжанина С.А., Петкова А.П. Исследование влияния низких температур и деформаций на свойства аустенитной стали 12Х18Н10Т // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. №4. С. 83–93.
17. Defect formation and influence on metallurgical structure due to powder cross-contaminations in LPBF / M. Horn et al. // Proceedings of 7th International Conference on Additive Technologies (iCAT), 2018.
18. A Review of the Laser Cladding of Metal-Based Alloys, Ceramic-Reinforced Composites, Amorphous Alloys, and High-Entropy Alloys on Aluminum Alloys / Zhao P., Shi Z., Wang X., Li Y., Cao Z., Zhao M., Liang J. // Lubricants. 2023, 11, 482. <https://doi.org/10.3390/lubricants11110482>
19. Евдокимов Е.Е., Коновалов О.В. Теория напряженного и деформированного состояния. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2020. 56 с.
20. Пеут Л.Е. Теория напряженного и деформированного состояния с примерами и задачами: учеб.-метод. пособие по разделу курса «Механика материалов» для машиностроительных специальностей. Минск: БНТУ, 2008. 106 с.
21. К вопросу построения предельной поверхности прочности торфяных структурных систем / Б.Ф. Зюзин, В.А. Миронов, А.Б. Зюзин, С.А. Юдин // Вестник ТВГТУ. 2014. № 2. Вып. 26. С. 55–64.

References

1. Solntsev Yu.P. Modern and promising steels for cryogenic technology. *Perspektivnye materialy* [Promising materials]. 1998;(3):68-81. (In Russ.)
2. Metallovedenie. Stal: spravochnik v 2-h tomah (chetyrekh knigah): per. s nem. Metallography. Steel: a reference book in 2 volumes (four books); trans. from Germ. Moscow: Metallurgiya, 1995, 399 p. (In Russ.)
3. Lebedev D.V. Konstruktivnaya prochnost kriogennoy staley [Structural strength of cryogenic steels]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 264 p. (In Russ.)
4. Solntsev Yu.P. Hladostoikie stali i splavy: uchebnik dlya vuzov [Cold-resistant steels and alloys: Textbook for universities]. Saint Petersburg: KHIMIZDAT, 2014, 476 p. (In Russ.)
5. Ulyanin E.A., Sorokina N.A. Stali i splavy dlya kriogennoy tekhniki: spravochnik [Steels and alloys for cryogenic technology: reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 206 p. (In Russ.)
6. Vigli D.A. Mekhanicheskie svoistva materialov pri nizkikh temperaturakh [Mechanical properties of materials at low temperatures]. Translation from English by V.N. Geminov; edited by L. K. Gordienko. Moscow: Mir, 1974, 373 p. (In Russ.)
7. Beresnev G.A. Factors influencing the susceptibility of steel to brittle fracture. *Problemy metallovedeniya i fiziki metallov: sb. tr.* [Problems of Metal Science and Physics of Metals: Collection]. Moscow: Metallurgiya. 1968;(9):157-162. (In Russ.)
8. Spektor Ya.Ya., Sarrik V.I., Entin R.I. On the causes of nickel influence on cold brittleness of iron. *DAN SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences]. 1964;155(5):156-157. (In Russ.)
9. Trefilov V.I., Milman Yu.V., Firstov S.A. Fizicheskie osnovy prochnosti tugoplavkih metallov [Physical foundations of strength of refractory metals]. Kyiv: Naukova Dumka, 1975, 296 p. (In Russ.)
10. Vologzhanina S.A., Igolkin A.F. *Khladostoikie materialy. Laboratornye raboty: ucheb.-metod. posobie* [Cold-resistant materials. Laboratory research: Study Guide]. Saint Petersburg: ITMO University, 2015, 42 p. (In Russ.)

11. Konstantinov V.M., Galimsky A.I., Khina B.B. Analysis of ways to improve cold resistance of a number of carbon and low-alloy structural steels. *Metallurgiya: respublikanskiy mezhvedomstvennyi sbornik nauchnyh trudov* [Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers]. Minsk: BNTU. 2015;36:177-185. (In Russ.)
12. Gurin M.A., Shafrai K.A. Features of increasing cold resistance of metal structures. *E-Scio* [E-Scio]. 2019;(8(35)):186-194. (In Russ.)
13. Tebianian M., Aghaie S., Razavi Jafari N.S., Elmi Hosseini S.R., Pereira A.B., Fernandes F.A.O., Farbakhti M., Chen C., Huo Y. Review of the Metal Additive Manufacturing Processes. *Materials*. 2023;16:7514. <https://doi.org/10.3390/ma16247514>
14. Schneck M., Horn M., Schmitt M. et al. Review on additive hybrid- and multi-material-manufacturing of metals by powder bed fusion: state of technology and development potential. *Prog Addit Manuf*. 2021;6:881-894. <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00205-2>
15. Meyer Ina, Marcus Oel, Tobias Ehlers, Roland Lachmayer. Additive manufacturing of multi-material parts. Design guidelines for manufacturing of 316L/CuCrZr in laser powder bed fusion. *Heliyon*. 2023;9(8).
16. Vologzhanina S.A., Petkova A.P. Study of the influence of low temperatures and deformations on the properties of austenitic steel 12Cr18Ni10Ti. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki* [SPbPU Scientific and Technical Bulletin. Natural and Engineering Sciences]. 2019;(4):83-93. (In Russ.)
17. Horn M. et al., Defect formation and influence on metallurgical structure due to powder cross-contaminations in LPBF. Proceedings of the 7th International Conference on Additive Technologies (iCAT). 2018.
18. Zhao P., Shi Z., Wang X., Li Y., Cao Z., Zhao M., Liang J. A Review of the Laser Cladding of Metal-Based Alloys, Ceramic-Reinforced Composites, Amorphous Alloys, and High-Entropy Alloys on Aluminum Alloys. *Lubricants*. 2023;11:482. <https://doi.org/10.3390/lubricants11110482>
19. Evdokimov E.E., Konovalov O.V. *Teoriya napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya* [Theory of stressed and strained state]. Volgograd: Volgograd State Technical University, 2020, 56 p. (In Russ.) ISBN 978-5-9948-3748-1.
20. Reut L.E. *Teoriya napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya s primerami i zadachami: ucheb.-metod. posobie po razdelu kursa «Mekhanika materialov» dlya mashinostroitelnykh spetsialnostey* [Theory of stressed and strained state with examples and problems: a study guide for the course Mechanics of Materials for mechanical engineering specialties]. Minsk: BNTU, 2008, 106 p. (In Russ.)
21. Zyuzin B.F., Mironov V.A., Zyuzin A.B., Yudin S.A. On the issue of constructing the ultimate strength surface of peat structural systems. *Vestnik TvGTU* [Bulletin of TVSTU]. 2014;26(2):55-64. (In Russ.)

Поступила 16.06.2025; принята к публикации 15.08.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 16/06/2025; revised 15/08/2025; published 25/12/2025

Колчин Павел Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия.
Email: p.v.kolchin@ipfran.ru. ORCID 0000-0002-2875-7377

Костылев Константин Андреевич – кандидат технических наук,
заведующий сектором акустического инжиниринга,
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия.
Email: kostylev@ipfran.ru. ORCID 0000-0003-1061-9192

Чернигин Михаил Алексеевич – аспирант,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: honeybadger52@yandex.ru. ORCID 0009-0005-6494-2851

Pavel V. Kolchin – PhD(Eng.), Researcher,
Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russia.
Email: p.v.kolchin@ipfran.ru. ORCID 0000-0002-2875-7377

Konstantin A. Kostylev – PhD(Eng.), Head of Acoustic Engineering Sector,
Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russia.
Email: kostylev@ipfran.ru. ORCID 0000-0003-1061-9192

Mikhail A. Chernigin – Postgraduate Student,
Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: honeybadger52@yandex.ru. ORCID 0009-0005-6494-2851