УДК 669.14:624.21

РАЗРАБОТКА И ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ПРОКАТА ИЗ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

А. А. ПРИДЕИН¹, начальник управления технического сопровождения прокатного производства, a.pridein@uralsteel.com; Л. В. ПРОКОПЕНКО¹, начальник прокатного отдела; О. В. САМОХИНА¹, начальник термического отдела; С. П. ЗУБОВ¹, технический директор; Д. А. ШАБЛЯ¹, ведущий специалист по прокатному производству; И. Ф. ПЕМОВ², руководитель проекта Института металлургии и машиностроения
(¹ АО “Уральская Сталь”, Россия, Оренбургская обл., г. Новотроицк;
² АО “НПО “ЦНИИТМАШ”, Россия, г. Москва)

Аннотация. В процессе реализации национального проекта “Безопасные и качественные автомобильные дороги” предстоит соорудить большое количество мостовых переходов, в том числе стальных автодорожных мостов с малыми (14–42 м) пролетами вместо железобетонных мостов. Применение в металлоконструкциях мостов с малыми пролетами металлопроката из сталей 10ХСНД, 15ХСНД, 10ХСНДА, 15ХСНДА неоправданно увеличивает себестоимость производимых конструкций мостов. Данное обстоятельство обуславливает необходимость разработки и освоения недорогой экономнолегированной стали, предназначенной для изготовления типовых малопролетных мостов с минимальным и экономным способом легирования с сохранением комплекса потребительских свойств в нормализованном состоянии. В условиях стана АО “Уральская Сталь” выполнена опытно-экспериментальная работа по созданию экономнолегированной стали 12Г2СБД по СТО 13657842-1 с нормативным пределом текучести 345 МПа. Совместно с НИЦ “Мосты” ОАО ЦНИИС и ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина разработаны и согласованы технические требования к толстолистовому прокату для малопролетных мостов. Разработана комплексная технология производства толстолистого проката из стали 12Г2СБД. Произведена и отгружена в ЗАО “Курганстальмост” опытно-промышленная партия листового проката из стали 12Г2СБД. Определение сварочно-технологических характеристик проката опытно-промышленной партии показало, что прокат из стали 12Г2СБД характеризуется малой чувствительностью к тепловому воздействию сварочного термического цикла и может применяться в сварных конструкциях стальных пролетных строений мостов при использовании заводской и монтажной технологий сварки со стандартными режимами (по технологии сварки стали 10–15ХСНД). Применение заводской и монтажной технологий при сварке на стандартных режимах дает возможность использовать прокат из разработанной стали при изготовлении металлоконструкций малопролетных металлических мостов в обычном исполнении (расчетная минимальная температура до –40 °С включительно) и в северном исполнении зона А (расчетная минимальная температура до –50 °С включительно).

Ключевые слова: малопролетные металлические мосты, металлоконструкции автодорожных мостов, экономнолегированные стали, микролегирование, низколегированная сталь 12Г2СБД, ударная вязкость металла сварного шва.

Ссылка для цитирования: Придеин А.А., Прокопенко Л.В., Самохина О.В., Зубов С.П., Шабля Д.А., Пемов И.Ф. Разработка и промышленное освоение производства проката из экономнолегированной стали для изготовления металлоконструкций автодорожных мостов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 3. С. 228–233.

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-3-228-233

ELABORATION AND INDUSTRIAL IMPLEMENTATION OF LEAN ALLOY STEEL ROLLED STOCK PRODUCTION FOR STRUCTURES OF ROAD BRIDGES

A. A. PRIDEIN¹, Head of Dpt. "Technical support of rolling Production", a.pridein@uralsteel.com;
L. V. PROKOPENKO¹, Head of Rolling Dpt.; O. V. SAMOKHINA¹, Head of Thermal Dpt.;
S. P. ZUBOV¹, Technical director; D. A. SHABLYA¹, Leading Spec. of rolling Production;
I. F. PEMOV², Head of Project, Institute of metallurgy and machine science
(¹ JSC "Ural Steel", Russia, Orenburg rgn., Novotroitsk;
² JSC "NPO "CNIITMASH", Russia, Moscow)

Abstract. Within the national project "Safe and quality automobile roads" realization a big number of bridge passages will be constructed, including steel road bridges with small (14–42 m) spans instead of reinforced concrete bridges. Application of metal rolled products of 10XCHД, 15XCHД, 10XCHДА, 15XCHДА steels in the steel structures of bridges with small spans results in unreasonable increase the costs of the bridges structures. This circumstance stipulates necessity to elaboration and implementation of cheap lean alloy steel for manufacturing standard short-spanned bridges. The steel production should involve minimal and lean alloying method and ensure complex of operation properties in normalized state. At JSC "Ural Steel" an experiment work was accomplished for elaboration lean alloy steel 12Г2СБД due to STO 13657842-1 having standard yield strength 345 MPa. In cooperation with NIZ "Mosty", OJSC "CNIIS" and CNIИchermet after I.P. Bardin technical specifications of plates for short-spanned bridges were elaborated and approved. Comprehensive technology of 12Г2СБД steel plate production was elaborated. A trial batch of 12Г2СБД steel plates was produced and shipped to ZAO "Kurganstalmost". Study of welding and technological characteristics of the trial batch plates was carried out. The study showed, that the plates of 12Г2СБД steel have low sensitiveness against heat action of a welding thermal cycle and can be used in welding structures of steel bridge spans providing keeping the plant and assembling welding technology by standard regimes (due to welding technology of steel 10–15XCHД). Application of the plant and assembling technology at welding by standard regimes makes it possible to use the plates of the elaborated steel for manufacturing metal structures of short-spanned metal bridges for various weather conditions. The plated can be used for both a regular performance (the calculated minimum temperature is down to –40 °C inclusive) and a northern performance Zone A (the calculated minimum temperature is down to –50 °C inclusive).

Key words: short-spanned metal bridges, metal structures of road bridges, lean alloy steels, micro-alloying, low-alloyed steel 12Г2СБД, impact toughness of welding seam metal.

For citation: Pridein A.A., Prokopenko L.V., Samokhina O.V., Zubov S.P., Shablya D.A., Pemov I.F. Elaboration and industrial implementation of lean alloy steel rolled stock production for structures of road bridges. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2020, vol. 76, no. 3, pp. 228–233. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-3-228-233

АО "Уральская Сталь" имеет богатый опыт производства толстолистового проката, предназначенного для мостовых пролетных строений.

В 50–60-е годы прошлого века ФГУП ЦНИИчермет им. И.П. Бардина на базе природнолегированных халиловских руд ОХМК разработал стали для мостостроения: сталь халиловская 1 и сталь халиловская 2 (СХЛ-1 и СХЛ-2), которые в 1970-х годах вошли в мостовой ГОСТ 6713 соответственно как 15XCHД и 10XCHД и применяются в мостостроении по настоящее время.

В 90-е годы специалисты ФГУП ЦНИИчермет им. И.П. Бардина на базе АО "Уральская Сталь" проводили разработки новых сталей 10XCHДА и 15XCHДА улучшенной свариваемости и повышенной хладостойкости. Результатом этих работ стало включение сталей 10XCHДА и 15XCHДА по стандарту организации АО "Уральская Сталь" СТО 13657842-1 "Прокат конструкционный из низколегированных марок стали для мостостроения" в СНиП 2.05.03–84, а в дальнейшем в актуализированную редакцию свода правил "Мосты и трубы" СП 35.13330.2011.

На протяжении десятилетий стали 10XCHД, 15XCHД по ГОСТ 6713, 10XCHДА, 15XCHДА по СТО 13657842-1 надежно зарекомендовали себя при изготовлении мостовых пролетных строений как при изготовлении металлоконструкций для мостов в обычном исполнении (расчетная минимальная температура до –40 °C включительно), так и в северном исполнении зона А (расчетная минимальная температура до –50 °C включительно). Вновь разработанные стали (10XCHДА и 15XCHДА) были существенно дешевле в производстве и, соответственно, обеспечивали снижение стоимости металлоконструкций изготавливаемых мостов при обеспечении всех требований по безопасности и надежности этих сооружений. В связи с ежегодным увеличением объема выпуска стальных мостовых конструкций в России применение данных марок оказалось особенно актуальным. При этом наряду со строительством больших железнодорожных, автодорожных и городских мостов наметилась устойчивая тенденция к применению стальных автодорожных мостов с малыми пролетами (14–42 м) взамен железобетонных. Для ука-

занных конструкций требуется простая по легированию и, соответственно, еще более дешевая, технологичная на всех переделах, сталь класса прочности С345, прокат из которой обеспечивает в толщине 8–50 мм все основные требования, предъявляемые к материалу для металлических мостов.

Для изготовления элементов пролетных строений малопроелетных автодорожных мостов были попытки применять металлопрокат из стали 09Г2С по ГОСТ 19281. Для применения подобного проката из стали 09Г2С характерно заметное снижение нормативных значений прочностных характеристик при увеличении толщины листов более 10 мм. Кроме того, сталь 09Г2С зачастую не обеспечивает на должном уровне такие важные для мостостроения характеристики, как отсутствие расслоений, сплошность, гарантии сопротивления хрупкому разрушению и комплекс Z-свойств. Очевидно, что прокат из стали 09Г2С по ГОСТ 19281 далеко не полностью обеспечивает все требования, предъявляемые к металлопрокату для мостостроения; последнее обстоятельство приводит к заметному усложнению и утяжелению металлоконструкций, исключению возможности применения ряда прогрессивных конструктивных и технологических решений при проектировании, изготовлении и монтаже указанных конструкций. На практике такие недостатки в ряде случаев приводят к использованию для указанных конструкций более дорогого проката (10ХСНД, 15ХСНД по ГОСТ 6713, 10ХСНДА, 15ХСНДА по СТО 13657842-1), что неоправданно увеличивает себестоимость. Все вышесказанное сдерживает применение металлических конструкций при сооружении малопроелетных мостов, которые до настоящего времени в большей части изготавливаются с использованием сборного железобетона.

Таким образом, существовала необходимость разработки и освоения недорогой экономнолегированной стали, предназначенной для изготовления типовых малопроелетных мостов с минимальным и экономным способом легирования и сохранением комплекса потребительских свойств в нормализованном состоянии.

Данный фактор оказался ключевым при принятии решения по выполнению в условиях АО «Уральская Сталь» и АО «Курганстальмост» комплекса работ по созданию и промышленному опробованию экономнолегированной стали для изготовления металлоконструкций малопроелетных автодорожных мостов.

На первом этапе создания экономнолегированной стали для мостостроения с целью определения возможности обеспечения класса прочности проката не ниже 345 в толщине до 50 мм были выполнены лабораторные исследования по выявлению влияния химического состава на механические свойства стали системы легирования С–Mn–Si (в том числе с дополнительным микролегированием). С этой целью в лабораторных условиях в открытой индукционной печи с основной футеровкой было выплавлено семь десятикилограммовых плавов с различным сочетанием химических элементов по системе легирования С–Mn–Si с микролегированием медью, ниобием, ванадием. Слитки подвергали горячей деформации ковкой, а затем прокаткой на лабораторном стане 300 в полосы размером 12×65×1700 мм, полосы затем резались на «карты» размером 12×65×200 мм. Полученные «карты» подвергали термообработке — нормализации от температур 920–950 °С или закалке от температур 920–950 °С с высоким отпуском при температуре 650–680 °С. Для имитации условий нагрева и охлаждения при термообработке листов толщиной 40–50 мм «карты» из стали лабораторных плавов собирали в трехслойные пакеты (лист 20 мм + «карта» + лист 20 мм) и в таком виде подвергали термической обработке.

Анализ полученных результатов показал, что для надежного обеспечения в стали системы легирования С–Mn–Si класса прочности 345 в толщине до 50 мм в нормализованном состоянии необходимо:

- обеспечить массовую долю углерода в пределах 0,09–0,15 % при массовой доле марганца 1,10–1,70 %;
- применить микролегирование ниобием (0,02–0,06 %).

Кроме того, для исправления возможных случаев получения неудовлетворительных механических свойств в нормализованном состоянии («провалов») необходимо предусмотреть применение термического упрочнения стали — закалки с высоким отпуском. Исключительно важным при эксплуатации моста является сопротивление используемого проката атмосферной коррозии. В связи с этим необходимо легировать сталь медью — элементом, существенно повышающим сопротивление атмосферной коррозии, в количестве 0,20–0,40 %.

Таким образом, по результатам лабораторных исследований для изготовления малопроелетных мостов выбран базовый химический состав стали 09Г2С с корректировкой по микролегированию ниобием и медью (табл. 1).

**ТАБЛИЦА 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СТАЛИ ДЛЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
МАЛОПРОЛЕТНЫХ МОСТОВ**

TABLE 1. CHEMICAL COMPOSITION OF THE STEEL FOR STEEL STRUCTURES OF SHORT-SPANNED BRIDGES

Массовая доля элементов, %									
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	S	P	Nb
0,09–0,15	1,10–1,70	0,40–0,80	≤0,30	≤0,30	≤0,30	0,20–0,40	≥0,010	≥0,015	0,02–0,06

Далее на базе представленного в табл. 1 химического состава в ЦНИИчермет им. И.П. Бардина разработали технические условия на прокат конструкционный из низколегированной стали 12Г2СБД, которые позднее были включены в стандарт организации АО “Уральская Сталь” СТО 13657842-1.

Прокат из стали 12Г2СБД СТО 13657842-1 предназначен для изготовления сварных конструкций автодорожных мостов с пролетами 12–42 м, элементы которых в процессе монтажа и эксплуатации испытывают постоянные и периодические (циклические) нагрузки, прилагаемые как статическим, так и динамическим образом, в том числе при отрицательных температурах. Это предопределяет повышенные требования по пластичности, вязкости, сплошности, комплексу Z-свойств, свариваемости и т. д. Также, учитывая назначение проката, важным является определение ряда характеристик, которые наряду с сопротивлением хрупкому разрушению обеспечивают надежную эксплуатацию мостовых конструкций. К числу указанных характеристик так называемых потребительских свойств относят:

- циклическую прочность (предел выносливости);
- комплекс механических характеристик проката при растяжении в направлении толщины

листов, определяемый на сварных образцах, имитирующих сварные узлы пролетных строений.

Кроме указанных характеристик самого проката в состоянии поставки исключительно важными потребительскими свойствами являются его сварочно-технологические характеристики — механические и технологические свойства сварных соединений (выполняемых как в заводских, так и в монтажных условиях) при условии применения приемлемых для мостовых заводов технологических приемов сварки.

Определение потребительских свойств проката из стали 12Г2СБД проводили совместно с Институтом транспортного строительства на прокате двух опытно-промышленных плавок производства АО “Уральская Сталь”.

В состоянии поставки две опытно-промышленные плавки стали 12Г2СБД производства АО “Уральская Сталь” проходили входной контроль химического состава, механических и технологических свойств в Воронежской лаборатории ЦНИИСа. Результаты входного контроля стали 12Г2СБД по химическому составу представлены в табл. 2, по механическим свойствам — в табл. 3.

ТАБЛИЦА 2. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОПЫТНОЙ ПАРТИИ СТАЛИ 12Г2СБД

TABLE 2. CHEMICAL COMPOSITION OF TRIAL BATCH OF 12Г2СБД STEEL

Плавка, толщина листа	Массовая доля элементов, %										
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Ti	Cu	Al	Nb
Плавка 1, 12 мм	0,088	0,675	0,550	0,004	0,010	0,059	0,101	0,015	0,207	0,030	0,032
Плавка 2, 32 мм	0,140	0,675	0,659	0,005	0,010	0,062	0,100	0,014	0,212	0,023	0,035
Требования СТО 13657842-1	0,09–0,15	0,40–0,80	1,10–1,70	≥0,010	≥0,015	≥0,30	≥0,30	0,005–0,035	0,20–0,40	0,02–0,05	0,02–0,06

ТАБЛИЦА 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПЫТНОЙ ПАРТИИ СТАЛИ 12Г2СБД

TABLE 3. MECHANICAL CHARACTERISTICS OF TRIAL BATCH OF 12Г2СБД STEEL

Плавка, толщина листа	Код пробы	Механические свойства при растяжении*		Твердость HV	Угол изгиба, град., d = 1,5a
		предел текучести σ_T , МПа	временное сопротивление σ_B , МПа		
Плавка 1, 12 мм	10	<u>439; 441; 440</u> 440	<u>563; 562; 550</u> 558	<u>184–194</u> 189	180
Плавка 2, 32 мм	0	<u>420; 417; 422</u> 420	<u>561; 565; 570</u> 565	<u>186–199</u> 192	180

* В числителе приведены результаты испытаний, в знаменателе — средние значения.
Требования СТО 13657842-1: $\sigma_T = 345–450$ МПа, $\sigma_B = 490–685$ МПа.

Результаты испытаний на ударный изгиб (образцы Менаже) проката опытно-промышленных плавов из стали 12Г2СБД представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ НА ОБРАЗЦАХ МЕНАЖЕ

TABLE 4. RESULTS OF IMPACT TOUGHNESS MEASURING AT MENAGE SAMPLES

Плавка, толщина листа	Код пробы	Ударная вязкость KCU, Дж/см ² , при температуре*		
		–20 °C	–40 °C	–70 °C
Плавка 1, 12 мм	10	<u>340; 350; 330</u> 340	<u>307; 317; 340; 340; 340; 327</u> 328	<u>290; 315; 340</u> 315
Плавка 2, 32 мм	0	<u>227; 260; 250</u> 246	<u>205; 222; 255; 255; 255; 238</u> 238	<u>225; 235; 230</u> 229

* В числителе приведены результаты испытаний, в знаменателе — средние значения.
Требования СТО 13657842-1: KCU^{–60, –70} ≥ 39.

Результаты испытаний на ударный изгиб (образцы Шарпи) проката опытно-промышленных плавов из стали 12Г2СБД представлены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ НА ОБРАЗЦАХ ШАРПИ

TABLE 5. RESULTS OF IMPACT TOUGHNESS MEASURING AT CHARPY SAMPLES

Плавка, толщина листа	Код пробы	Ударная вязкость KCV, Дж/см ² , при температуре*	
		–20 °C	–40 °C
Плавка 1, 12 мм	10	<u>280; 280; 340; 340; 340; 320</u> 316	<u>260; 262; 265; 295; 340; 285</u> 281
Плавка 2, 32 мм	0	<u>167; 197; 207; 280; 220; 215</u> 214	<u>77; 132; 217; 195; 227; 170</u> 170

* В числителе приведены результаты испытаний, в знаменателе — средние значения.
Требования СТО 13657842-1: KCV^{–20, –40} ≥ 29.

Полученные результаты свидетельствуют, что прочностные и пластические характеристики, а также ударная вязкость металла сварного шва всех проб находятся на достаточно высоком уровне и обеспечивают нормативные требования стального мостостроения. Промеры твердости в наплавленном металле, зоне термического влияния соединения и околошовной зоне не выявили участков с высокой твердостью, а следовательно, и хрупкостью.

Сварные стыковые технологические пробы, выполненные из стали 12Г2СБ и заваренные на

погонных энергиях, как для проката по ГОСТ 6713 по заводской и монтажным технологиям, металл сварного шва и линия сплавления с основным металлом имеют высокую стойкость против хрупкого разрушения как при температуре –40 °C, так и при температуре –60 °C.

В целом полученные данные свидетельствуют о малой чувствительности проката из стали 12Г2СБД к тепловому воздействию сварочного термического цикла.

Высокий комплекс механических и технологических свойств проката опытно-промышленной

партии стали 12Г2СБД в нормализованном состоянии обеспечивается за счет химического состава стали (повышенная концентрация элементов, эффективно упрочняющих α -твердый раствор, таких как углерод, марганец и кремний), высокий уровень пластичности и вязкости — как за счет высокой чистоты по вредным примесям (сере и фосфору) и неметаллическим включениям всех типов, так и за счет формирования дисперсной и однородной феррито-перлитной структуры (зерно номера 9–10 стандартной шкалы), на что положительное влияние оказывает повышенное количество марганца и наличие ниобия в стали.

Проведенные специальные испытания потребительских свойств показали, что по комплексу Z-свойств, циклической прочности, стойкости к атмосферной коррозии толстолистовой прокат по СТО 13657842-1 полностью соответствует требованиям к металлопрокату по СП 35.13330.2011 “Мосты и трубы” и другим нормативным документам мостостроения.

Из проката опытно-промышленной партии стали 12Г2СБД производства АО “Уральская Сталь” сооружены мост через реку Тую в Башкирии (обычное исполнение), президентский мост в г. Нур-Султан, Казахстан, мост на автодороге Медвежье–Ямбург в Ямало-Ненецком автономном округе (исполнение “Север А”).

Поступила 23 декабря 2019 г.

Received December 23, 2019