УДК 621.771.8

О.В. ЗАГОРЯНСКИЙ

ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ЛИСТОВОЙ ДВУХСЛОЙНОЙ КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПЛАКИРОВАНИЕМ ПРОКАТКОЙ

Статья посвящена исследованию механических свойств двухслойного коррозионно-стойкого листового проката (на примере композиции сталей 09Г2С и 12Х18Н10Т), получаемого плакированием прокаткой. Технологические параметры процесса плакирования прокаткой принимались в соответствии с разработанной ранее моделью. Установлено, что максимальная прочность соединения слоев обеспечивается при относительной деформации в первом проходе плакирования прокаткой не менее 45%. Механические испытания образцов из полученных двухслойных листов определялись в соответствии с методикой испытаний, приведенной в ГОСТ 10885-85. Описана методика испытаний слоев на отрыв и приведены результаты испытаний. Результаты механических испытаний двухслойных листов показали, что значения механических свойств двухслойных листов значительно превышают минимальные регламентированные стандартом для данного вида проката.

Ключевые слова: коррозионно-стойкая сталь, низколегированная сталь повышенной прочности, плакирование прокаткой, двухслойная композиция, механические свойства.

Стаття присвячена дослідженню механічних властивостей двошарового корозійно-стійкого листового прокату (на прикладі композиції сталей 09Г2С і 12Х18Н10Т), одержуваного плакуванням прокаткою. Технологічні параметри процесу плакирования прокаткою приймалися відповідно до розробленої раніше моделлю. Встановлено, що максимальна міцність з'єднання шарів забезпечується при відносній деформації в першому проході плакування прокаткою не менше 45%. Механічні випробування зразків з отриманих двошарових листів визначалися відповідно до методики випробувань, наведеної в ГОСТ 10885-85. Описана методика випробувань шарів на відрив і наведені результати випробувань. Результати механічних випробувань двошарових листів показали, що значення механічних властивостей двошарових листів значно перевищують мінімальні регламентовані стандартом для даного виду прокату.

Ключові слова: корозійно-стійка сталь, низьколегована сталь підвищеної міцності, плакування прокаткою, двошарова композиція, механічні властивості.

The article is devoted to the investigation of the mechanical properties of a two-layer corrosion-resistant sheet metal (for example, the composition of steels 09Г2С and 12Х18Н10Т), obtained by cladding by rolling. The necessity of conducting theoretical and experimental investigations of the process of obtaining a two-layer rolled metal is due to the continuous expansion of the sphere of its application, increasing requirements to its properties. On the base of analysis of the components of the corrosion-resistant two-layer bimetallic sheet to explore the regularities of properties formation of corrosion-resistant bimetal obtained using the method of cladding by rolling. As methodology were used the regularities of the formation and behavior of various phases in alloy steels, which influence the composition, properties and processing of steels. As findings of the paper we can consiner promising technologies for production and further processing of laminated metal composites are specific, the output parameters of the process depend on various factors associated with the application of considerable deforming forces and the use of high-energy treatment methods, therefore require further theoretical and experimental development. Originality (value) of the paper consists in investigating the regularities of formation of properties of corrosion-resistant bimetal obtained using the method of cladding by rolling.

Keywords: corrosion-resistant steel, low-alloy steel of high strength, cladding by rolling, two-layer composition, mechanical properties.

Введение. Одним из способов повышения коррозионной стойкости сталей является их специальное легирование за счет введения элементов, увеличивающих термодинамическую устойчивость стали или образующих на поверхности защитную пленку. Однако применение коррозионно-стойких металлов, в частности стали аустенитного класса, ограничено. Это вызвано ее высокой стоимостью, обусловленной содержанием дорогих и дефицитных хрома и никеля, а также пониженной прочностью по сравнению, к примеру, с низколегированными сталями повышенной прочности. Применение вместо коррозионно-стойких сталей слоистых металлических композиций данного назначения, чаще всего двухслойных сталей, позволяет уменьшить стоимость конструкций.

Анализ последних исследований и литературы. Известно, что на сегодняшний день для производства коррозионно-стойкого биметаллического проката главным образом используются плакирование пакетной прокаткой с вакуумированием пакетов [1], электрошлаковая наплавка, а также плакирование взрывом [2].

Комплекс свойств, включающий высокие коррозионную стойкость плакирующего слоя и прочность основного слоя, является основным преимуществом коррозионно-стойких биметаллов перед монометаллами данного назначения. Коррозионно-стойкая двуслойная сталь обладает в 2-3 раза более высокой теплопроводностью, чем монометаллические коррозионно-стойкие стали, что определяет их применение для теплообменной аппаратуры.

Наиболее широкое использование в промышленности получили двухслойные стали с плакирующим слоем из аустенитных хромоникелевых сталей 08(12)Х18Н10, стабилизированных титаном или ниобием, а также хромистой ферритной стали 08Х13 и хромоникелевой стали с молибденом (10Х17Н13М2Т). Известно [1], что на 1990 г. выпуск листов с плакирующим слоем из хромоникелевых сталей составил три четверти общего объема производства биметаллического коррозионно-стойкого проката.

Способность плакирующего слоя двухслойной стали противостоять коррозии в той или иной среде определяет области ее применения. Сталь 12Х18Н10Т относится к сталям для применения в средах средней агрессивности. Сталь устойчива по отношению к азотной, холодной фосфорной и органическим кислотам (за исключением уксусной, муравьиной, молочной, щавелевой), к растворам многих солей и

© О. В. Загорянский, 2017

щелочей, морской воде, влажному воздуху; неустойчивы в соляной, серной, плавиковой, горячей фосфорной, кипящих органических кислотах. Обладает удовлетворительной сопротивляемостью межкристаллитной коррозии.

Сталь 12Х18Н10Т обычно применяют в виде холоднокатаного листа (лист толстый – ГОСТ 7350-77 «Сталь толстолистовая коррозионно-стойкая, жаростойкая и жаропрочная. Технические условия», лист тонкий – ГОСТ 5582-75 «Прокат тонколистовой коррозионно-стойкий, жаростойкий и жаропрочный. Технические условия») или ленты (ГОСТ 4986-79 «Лента холоднокатаная из коррозионно-стойкой и жаростойкой стали. Технические условия»).

По ГОСТ 7350-77 сталь 12Х18Н10Т в листовом прокате сечением свыше 4 мм должна иметь следующие механические свойства: $\sigma_т$ не менее 236 МПа; $\sigma_в$ не менее 530 МПа; δ_5 не менее 38. Для листового проката из стали 12Х18Н10Т по ГОСТ 7350-77 применяется закалка при 1000…1080 °С.

Низколегированные стали повышенной прочности широко применяются вместо низкоуглеродистых сталей (при этом уменьшение расхода металла составляет 20…50%) [4]. В сравнении с последними, они характеризуются повышенной стойкостью против коррозии, меньшей чувствительностью к хрупким разрушениям. К их основным недостаткам относятся несколько большая стоимость, повышенная чувствительность к концентрации напряжений.

По ГОСТ 5520-79 «Прокат листовой из углеродистой, низколегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением» сталь 09Г2С в листовом прокате толщиной 80…160 мм иметь следующие механические свойства: $\sigma_т$ не менее 265 МПа; $\sigma_в$ не менее 430 МПа; δ_5 не менее 21 %; при +20 °С ударная вязкость KCU должна быть не менее 59 Дж/см^2.

В настоящее время к главным задачам в области производства и применения слоистых металлических композиций следует отнести расширение сортамента и повышение их качества (увеличение прочности соединения слоев, улучшение геометрических параметров и точности композиций, стабилизацию механических свойств и структуры, улучшение качества поверхности, в том числе улучшение ее служебных свойств, и т. д.), а также дальнейшее расширение областей их применения в различных отраслях хозяйства, что должно базироваться на анализе потребности (существующей и перспективной) в различных видах слоистых металлических композиций, а также на производственных возможностях действующего технологического оборудования [3,6].

Цель исследования, постановка проблемы. Экспериментальная апробация разработанной ранее методики определения оптимальных параметров получения плакированием прокаткой двухслойного коррозионно-стойкого листового проката (на примере сочетания сталей 9Г2С и 12Х18Н10Т) и исследование механических свойств двухслойных листов из сталей этой композиции.

Материалы исследований. Исследователями Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского проведен комплекс исследований по получению плакированием прокаткой и дальнейшей обработке коррозионно-стойких двухслойных композиций толщиной 20 мм: материал основного слоя – лист стали 09Г2С, материал плакирующего слоя – лист стали 12Х18Н10Т.

Параметры плакирования прокаткой назначались с учетом известной модели [5] расчета оптимальных параметров плакирования, согласно которой в диапазоне скоростей прокатки (2…20 м/с) и при диаметрах валков 100, 200, 400 и 500 мм, температуре нагрева пакетов 1100…1150 ºС, прочное соединение получается при степени деформации в первом проходе, равной не менее 45%.

Кратко опишем использованную методику механических испытаний полученного листового коррозионно-стойкого биметалла. Методы испытаний двухслойных листов приведены в п. 4 ГОСТ 10885-85.

Размеры полученных двухслойных листов и их неплоскостность контролировались (согласно п. 4.3 ГОСТ 10885-85) в соответствии с требованиями ГОСТ 19903-74 «Прокат листовой горячекатаный. Сортамент» и ГОСТ 26877-91 «Металлопродукция. Методы измерения отклонений формы».

Сплошность сцепления слоев (согласно п. 4.15 ГОСТ 10885-85) проверялась ультразвуковым контролем по ГОСТ 22727-88 «Прокат листовой. Методы ультразвукового контроля».

Образцы для испытаний на растяжение и ударный изгиб отбирались (согласно пункту 4.4 ГОСТ 10885-85) в соответствии с требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 7564-97 «Прокат. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов для механических и технологических испытаний».

Испытание на растяжение проводилось (согласно пункту 4.11 ГОСТ 10885-85) по ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» на образцах с коррозионно-стойким слоем. Листы толщиной 16–25 мм испытывают на плоских образцах.

Испытание на ударный изгиб основного слоя при нормальной и пониженной температурах (согласно п. 4.12 ГОСТ 10885-85), проводилось на образцах с предварительно удаленным коррозионно-стойким слоем по ГОСТ 9454-78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах». За результаты испытаний принималось среднее арифметическое из трех образцов.

Наиболее распространенным количественным методом оценки прочности соединения слоев в биметаллах является испытание, проводимое с целью определения прочности на срез и отрыв. Испытание образцов на срез имеет целью количественно

установить прочность связи плакирующего и основного слоев.

Прочность соединения слоев двухслойных листов (согласно пункту 4.6 ГОСТ 10885-85) проверялись испытанием на срез с определением сопротивления срезу по плоскости соприкосновения основного и коррозионно-стойкого слоев. Для испытаний на срез при толщине биметалла свыше 8 мм используют образцы со «ступенькой», получившие широкое распространение как у нас в стране, так и за рубежом.

Форма образца со «ступенькой», схема и метод испытания двухслойных листов приведены в обязательном приложении «Метод испытания двухслойных листов на срез коррозионно-стойкого слоя» к ГОСТ 10885-85. Согласно п. 2.16 ГОСТ 10885-85, сопротивление срезу при определении по требованию потребителя прочности соединения слоев стали с плакирующим покрытием 2 мм и более должно быть не менее 147 Н/мм^2 (МПа).

Прочность сцепления слоев в биметаллах определяют по результатам испытания на отрыв по известным методикам [7,8]. Испытание на отрыв для биметаллических образцов (как биметаллического проката, так и полученных плакированием взрывом) толщиной свыше 20 мм производят при растяжении стандартных цилиндрических образцов (рис. 1) [7,8]. На рис. 1 обозначены: 1 – основной слой; 2 – плакирующий слой; 3 – зона соединения, Р – прилагаемая нагрузка.

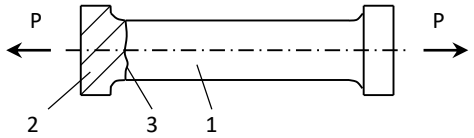

Рис. 1 – Схема испытания образцов биметалла (толщиной свыше 20 мм) для определения прочности соединения слоев на отрыв

Толщины исходных листов плакирующего слоя из стали 12Х18Н10Т были приняты (здесь и далее размеры по рекомендациям [5]) равными 15 мм, толщины листов основного слоя из стали 09Г2С – 85 мм. Размеры исходных листов из стали 09Г2С были приняты 85×1200×1900, листов из стали 12Х18Н10Т – 15×1100×1750 мм (в соответствии с ГОСТ 19903-74 «Прокат листовой горячекатаный. Сортамент»).

Толщины полученных двухслойных листов составили 21,3…19 мм, что для номинальной толщины листов 20 мм соответствует (согласно п. 1.4 ГОСТ 10885-85) диапазону предельных отклонений ±1,4 мм.

Толщина плакирующего слоя составила 2,7…3,6 мм, что для номинальной толщины листов 20 мм соответствует (согласно п. 1.2 ГОСТ 10885-85) диапазону толщин 2,5…3,5 мм для нормальной толщины коррозионно-стойкого слоя и 3…4 мм для повышенной толщины.

Сплошность сцепления слоев полученной двухслойной стали, проверенная на 100 % листов, показала практически полную сплошность. На одном листе определена несплошность у кромки длинной стороны листа.

Результаты испытаний механических свойств двухслойных листов, полученных плакированием прокаткой (без последующей термической обработки), приведены в табл. 1 ($\sigma_{ср}$ – прочность соединения слоев листа на срез, $\sigma_{отр}$ – прочность соединения слоев листа на отрыв).

Таблица 1 – Механические свойства биметаллических листов 09Г2С+12Х18Н10Т толщиной 20 мм, полученных плакированием прокаткой (без термообработки)

Механические свойства	Нормируемое минимальное значение по ГОСТ	Среднее по пяти образцам
$\sigma_т$, МПа	325	362
$\sigma_в$, МПа	470	504
δ_5, %	21	19
KCU^{+20}, Дж/см	59	67
$\sigma_{ср}$, МПа	147	306
$\sigma_{отр}$, МПа	–	435

Согласно п. 2.6 ГОСТ 10885-85 «Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионно-стойкая. Технические условия», механические свойства двухслойных листов, к которым относятся и исследуемые в работе листы из сочетания марок стали основного и плакирующего слоев 09Г2С+12Х18Н10Т, должны соответствовать требованиям стандартов на сталь марок основного слоя. Для стали основного слоя марки 09Г2С, согласно п. 2.6 ГОСТ 10885-85, – это ГОСТ 5520-79 «Прокат листовой из углеродистой, низколегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением».

В табл. 1 для сравнения приведены нормируемые минимальные значения механических свойств двухслойных листов по ГОСТ 5520-79 для стали основного слоя 09Г2С толщиной от 10 до 20 мм и минимальное значение сопротивления срезу по ГОСТ 10885-85.

В случае, когда прочность стали плакирующего слоя выше, чем прочность стали основного слоя (случай рассматриваемой композиции), полную усредненную прочность биметалла можно определить по зависимости [7]:

$$\sigma_в^{12} = \sigma_в^1 + R\left(\sigma_в^2 - \sigma_в^1\right), \qquad (1)$$

где $\sigma_в^{12}$, $\sigma_в^1$ и $\sigma_в^2$ – соответственно пределы прочности биметалла, основного и плакирующего слоя, R – доля плакирующего слоя в общей толщине металла.

Для полученных образцов отличие значений предела прочности двухслойных листов по результатам механических испытаний (средним по пяти образцам) и по зависимости (1) не превышает 5%, что позволяет использование зависимости (1) для прогнозирования прочности двухслойных листов.

Выводы. Двухслойная коррозионно-стойкая сталь, где в качестве плакирующего слоя используется аустенитная коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т (наиболее распространенная сталь для плакирующего слоя), а в качестве основного слоя – низколегированная сталь повышенной прочности 09Г2С (благодаря своей распространенности и относительной дешевизне), имеет прочность заметно

выше по сравнению с композициями, где в качестве основного слоя применяются низкоуглеродистые стали. Композиция 09Г2С+12Х18Н10Т имеет широкие перспективы использования в различных изделиях и конструкциях, в первую очередь для работы в средах средней агрессивности при требованиях к повышенной прочности конструкции.

Результаты механических испытаний двухслойных листов, полученных с использованием разработанной ранее модели для определения оптимальных температурно-скоростных параметров плакирования прокаткой, показали, что значения механических свойств двухслойных листов значительно превышают минимальные регламентированные стандартом для данного вида проката. Это же справедливо для прочности соединения слоев в полученных двухслойных листах. Значения прочности на отрыв двухслойных листов, полученных плакированием прокаткой, максимальны при относительной деформации не менее 45%.

Список литературы

1. *Быков А. А.* Развитие производства биметаллов. Ч. 1 / А. А. Быков // Металлург. – 2009. – № 8. – С. 70–75.
2. *Dragobetsky V. V.* Process modeling of elastic-plastic deformation of steel-aluminum compositions produced by impact bonding / V. V. Dragobetsky, V. G. Zagoryansky, A. V. Voronin // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 9. – pp. 1186–1189.
3. *Луценко В. О.* Напрямки розвитку виробництва двошарових листів [Електронний ресурс] / В. О. Луценко // Електронне наукове фахове видання «Науковий вісник Донбасу». – 2007. – № 4 (4). – Режим доступу: http://nvd.luguniv.edu.ua/archiv/NN4/07lvovdl.pdf.
4. *Чертов І. М.* Зварні конструкції / І. М. Чертов. – К.: Арістей, 2006. – 376 с.
5. *Драгобецкий В. В.* Моделирование оптимальных температурно-скоростных режимов сварки прокаткой коррозионно-стойкого биметалла / В. В. Драгобецкий, С. В Галата // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – № 2 (191). – Ч. 1. – Луганськ: СНУ імені Володимира Даля, 2013. – С. 5–9.
6. *Шабалов И. П.* Ресурсосберегающие технологии производства толстолистового проката с повышенными потребительскими свойствами / И. П. Шабалов, З. К. Шафигин, А. Н. Муратов. – М. : Металлургиздат, 2007. – 352 с.
7. *Лысак В. И.* Материаловедение и технология композиционных материалов: учебник для вузов / В. И. Лысак, А. Г. Кобелев, В. Н. Чернышев. – М. : Интермет Инжиниринг, 2005. – 368 с.
8. *Лысак В. И.* Сварка взрывом: научная монография / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М : Машиностроение-1, 2005. – 544 с.

References (transliterated)

1. Bykov, A. A. "Development of production of bimetals", *Metallurg*. No. 8. 2009. 70–75. Print.
2. Dragobetsky, V. V., V. G., Zagoryansky and A. V. Voronin "Process modeling of elastic-plastic deformation of steel-aluminum compositions produced by impact bonding", *Metallurgical and Mining Industry*. No. 9. 2015. 1186–1189. Print.
3. Lutsenko, V. O. "Napryamki rozvytku vyrobnytstva dvohsharovyh lystiv". *Electronne naukove fahove vydannya «Naukovyj visnyk Donbasu»*, № 4 (4). 2007. http://nvd.luguniv.edu.ua/archiv/NN4/07lvovdl.pdf.
4. Chertov, I. M. *Zvarni konstruktsii*. Kiev: Aristej, 2006. Print.
5. Dragobetsky, V. V. and S. V. Galata. "Modelling of optimal temperature-speed modes of welding by rolling of corrosive-resistant bimetal", *Visnyk Shidnoukrains'kogo natsional'nogo univresitetu imeni Volodymira Dalya*. No. 2 (191), part 1. 2013. 5–9. Print.
6. Shabalov, I. P., Z. K. Shafigin and A. N. Muratov. *Resursosberegayushchie tehnologii proizvodstva tolstolistovogo prokata s povyshennymi potrebitel'skimi svojstvami*. Moskow: Metallurgizdat, 2007. Print.
7. Lysak, V. I., A. G. Kobelev and V. N. Chernyshev (2005), *Materialovedenie i tehnologiya kompozitsionnyh materialov*. Moscow: Intermet Ingeneering, 2005. Print.
8. Lysak, V. I. *Svarka vzryvom*. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005. Print.

Надійшла (received) 20.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Формування властивостей листової двохшарової корозійно-стійкої сталі, отриманої плакуванням плющенням / О. В. Загорянський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія:.Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 10–13 – Библиогр.: 8 назв.– ISSN 2519-2671

Формирование свойств листовой двухслойной коррозионно-стойкой стали, полученной плакированием прокаткой / О. В. Загорянский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія:.Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 10–13 – Библиогр.: 8 назв.– ISSN 2519-2671

Formation of the properties of sheet two-layer corrosion-resistant steel produced by cladding by rolling / O. V. Zagoryanskii // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 35(1257). – P. 10–13. – Bibl.:8. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Загорянський Олег Володимирович – аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; тел.: (050) 702-39-10; e-mail: olehzahor@gmail.com

Загорянский Олег Владимирович – аспирант, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского; тел.: (050) 702-39-10; e-mail: olehzahor@gmail.com

Zagoryanskii Oleg Vladimirovich – aspirant, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University; tel.: (050) 702-39-10; e-mail: olehzahor@gmail.com