

УДК 621.771.8: 621.7.01

Загорянский В. Г.

**РАСЧЕТ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ
КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВ**

Несмотря на активное развитие, особенно в западных странах, технологий получения биметаллов (таких, как плакирование взрывом, нанесение наплавленного слоя и др.), основным методом получения коррозионностойких биметаллических листов является пакетная горячая прокатка [1].

В общем случае к энергосиловым параметрам процесса прокатки, относят усилие и работу деформирования, а также связанные с ними возможность разрушения рабочего инструмента или оборудования [2].

Коллективом исследователей Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского под руководством д-ра техн. наук, проф. Драгобецкого В. В. для соответствующей расчетной схемы по разработанной методике проведены расчеты [3], на основе которых определен оптимальный диапазон температурно-деформационных параметров, обеспечивающий при горячей прокатке прочное соединение для характерного случая параметров коррозионностойкого биметалла 09Г2С+12Х18Н10Т.

Наиболее близко к данному сочетанию стоит сочетание сталей СХЛ-45 (10ХГСН1Д)+12Х18Н10Т, энергосиловые параметры горячей прокатки которого исследовались в работе [4]. Отметим, что согласно ГОСТ 10885-85 «Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионно-стойкая. Технические условия», сталь 10ХГСН1Д в качестве стали основного слоя используется лишь в сочетании со сталью плакирующего слоя 12Х18Н10Т. Гораздо более универсальным является сочетание с коррозионностойкими сталями (в том числе со сталью 12Х18Н10Т) низколегированных сталей повышенной прочности 09Г2С и 16ГС.

Отметим, что для направления получения горячей прокаткой коррозионностойких биметаллов информация, касающаяся температурных и силовых условий деформации при прокатке, необходимых для расчета энергетических показателей, весьма разрознена и фрагментарна. Поэтому задача разработки универсальной, обобщенной методики расчета энергосиловых параметров своевременна.

Цель работы – расширение полученных ранее знаний об оптимальном диапазоне температурно-деформационных условий горячей прокатки коррозионностойкого биметалла (композиция 09Г2С+12Х18Н10Т) на уровень энергосиловых параметров процесса, то есть на производственно-технологический уровень, обоснованный для его промышленного использования.

Получение биметаллов горячей прокаткой является высокотемпературным процессом (температура нагрева перед прокаткой исходных заготовок для наиболее распространенных коррозионностойких биметаллов – углеродистая или низколегированная сталь + коррозионностойкая сталь составляет 1200–1250 °С [5]). Наибольшее распространение получили коррозионностойкие биметаллы из металлургически однородных металлов, таких как углеродистые стали (основа) и коррозионностойкие стали ферритного и аустенитного класса или никелевые сплавы (плакировка) [1, 5]. Горячая прокатка выполняется на тех же листовых прокатных станах, что и листов монометаллов аналогичных размеров [5].

Производство в мире толстого биметаллического листа интенсивно развивается. Основными поставщиками его на мировой рынок являются Япония, Германия, США и другие страны [6]. Как отмечается в работе [6], потребность России в таком листе непрерывно растет, и, возможно, Россия станет его главным потребителем.

Производство коррозионностойких биметаллических листов было организовано еще в советское время на предприятиях Российской Федерации (Орско-Халиловском (Оренбургская обл.), Челябинском металлургических комбинатах, Кузнецком и Ижорском

(Санкт-Петербург) заводах) [6, 7]. В Украине такое производство имеется на Алчевском металлургическом комбинате (Луганская область) и на Мариупольском металлургическом комбинате имени Ильича. На первом предприятии изготавливают биметаллические листы толщиной 5–50 мм, шириной 1200–2500 мм, длиной до 12 м [8], на втором – толстолистовой биметалл для сосудов высокого давления и других металлоконструкций ответственного назначения [9].

Отмечается [6], что биметаллический лист в России (очевидно, это справедливо и для Украины) пока производится не в таком объеме, какого требуют перспективные планы развития основных отраслей промышленности, потребляющих биметаллический лист.

Разработку методики расчета энергосиловых показателей процесса прокатки коррозионностойкого биметалла, целесообразно начать с обоснования зависимостей и постоянных величин для среднего контактного давления – давления, которое было бы при условии равномерного распределения его по контактной поверхности (поверхности касания полосы с валками) [10].

Среднее контактное давление p_{cp} можно представить как частное от деления усилия прокатки P на площадь контактной поверхности F_k [10]:

$$p_{cp} = \frac{P}{F_k}, \quad (1)$$

где P – усилие прокатки (равнодействующая всех элементарных сил нормального давления и трения, приложенных к металлу со стороны валков) [10]. Усилие прокатки P при установившемся процессе прокатки направлено перпендикулярно к оси полосы вне зависимости от его величины [10].

В случае прокатки полос прямоугольного сечения в цилиндрических валках форма поверхности касания полосы с валками в плане может быть принята за трапецию с основаниями b_0 (ширина полосы до прокатки) и b_1 (ширина полосы после прокатки) и высотой l_d (длина очага деформации) [11].

Следовательно, площадь контактной поверхности определится по формуле [10]:

$$F_k = 0,5(b_0 + b_1)l_d, \quad (2)$$

где l_d – длина очага деформации (горизонтальная проекция дуги контакта прокатываемой полосы и валков), с большой долей точности определяемая по формуле [10]:

$$l_d = \sqrt{R\Delta h}, \quad (3)$$

где R – радиус валков прокатного стана, Δh – абсолютная деформация (обжатие) полосы, $\Delta h = H - h_1$, где H – толщина полосы (пакета) при входе в валки, h_1 – толщина полосы (пакета) после обжатия в валках.

Отношение длины очага деформации к средней толщине полосы l_d/h_{cp} (коэффициент формы или фактор формы) является важнейшей характеристикой геометрических условий деформации [10]. Среднюю толщину полосы в очаге деформации обычно определяют с достаточной точностью как среднеарифметическую [10]:

$$h_{cp} = \frac{H + h_1}{2} \quad (4)$$

Расчет площади контактной поверхности F_k в большинстве случаев не вызывает больших трудностей. Главная задача в теории расчета усилия прокатки заключается именно в определении среднего контактного давления [10].

В случае горячей прокатки биметаллических листов среднее контактное давление определяется как [4, 11]:

$$p = 1,15[\sigma_{u.T} + a(\sigma_{u.T} - \sigma_{u.M})] \left(\frac{l_d}{h_{cp}} \right)^{-0,4}, \quad (5)$$

где $\sigma_{u.T}$ и $\sigma_{u.M}$ – истинное сопротивление твердого и мягкого слоев биметаллического пакета, a – доля твердого слоя в пакете.

Для определения истинного сопротивления деформации различных сталей при практическом использовании в инженерных расчетах рекомендуется [12, 13] следующая аналитическая зависимость общего вида (σ_u в МПа):

$$\sigma_u = S\sigma_0 u^a (10\varepsilon)^b \left(\frac{t}{1000} \right)^c, \quad (6)$$

где S , a , b , c – постоянные, определяемые для каждой марки стали по результатам испытаний (значения их приведены в [12, 13]); σ_0 – базовое сопротивление деформации при базовых значениях: $u = 1 \text{ с}^{-1}$, $\varepsilon = 0,1$, $t = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$; u – скорость деформации, с^{-1} ; ε – условная относительная деформация (обжатие), в долях единицы; t – температура, $^\circ\text{C}$.

Постоянные величины к зависимости (6), полученные в результате испытаний на пластометре (установка для определения сопротивления деформации металла и его пластических свойств) и компьютерной обработки, представлены в работах [12, 13] (для некоторых марок сталей приведены в табл. 1).

Таблица 1

Постоянные величины к зависимости (6) для некоторых сталей

Марка стали	S	σ_0 , МПа	a	b	$-c$
Ст. 3сп	0,96	90,7	0,124	0,167	2,54
35ГС	0,975	89,6	0,136	0,187	2,79
15ХСНД	0,88	93,2	0,122	0,226	2,9
12Х18Н10Т	0,825	222	0,112	0,088	4,35

Указывается [14], что в зависимость (6) входят средние по дуге контакта значения скорости u и степени деформации ε :

$$u = \frac{v \Delta h}{l_\partial H}, \quad (7)$$

где v – скорость прокатки;

$$\varepsilon = \frac{2 \Delta h}{3 H} \quad (8)$$

Анализируя табл. 1, можно сделать вывод, что при переходе от стали к стали, близких по химическому составу к стали 09Г2С, прослеживается определенная тенденция. Исходя из нее, можно аппроксимировать постоянные величины для стали 09Г2С, значения для которой не приведены в работах [13,9]: $S = 0,9$; $\sigma_0 = 90 \text{ МПа}$; $a = 0,13$; $b = 0,2$; $c = -2,8$.

Зависимость (6) для стали 09Г2С (мягкий слой биметалла), с учетом значений табл. 1, будет иметь вид:

$$\sigma_u = 81u^{0,13} (10\varepsilon)^{0,2} \left(\frac{t}{1000} \right)^{-2,8}, \quad (9)$$

а для стали 12Х18Н10Т (твердый слой биметалла) будет иметь вид:

$$\sigma_u = 188,7u^{0,112} (10\varepsilon)^{0,088} \left(\frac{t}{1000} \right)^{-4,35} \quad (10)$$

Исследователями КрНУ имени Михаила Остроградского ранее рассчитан [3] оптимальный диапазон температурно-скоростных условий при получении коррозионностойкого биметалла сочетания 09Г2С+12Х18Н10Т горячей прокаткой, обеспечивающий прочное соединение. Исходная толщина слоев – 85 мм (основной) + 15 мм (плакирующий). При обжатии 45% в первом проходе толщина раската 55 мм. Для диаметров валков $D = 100, 200, 400, 500 \text{ мм}$ $\varepsilon \geq 0,45 \%$; скорость прокатки $v = 12\text{--}20 \text{ м/с}$; температура нагрева заготовок $T = 800\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Значения для подстановки в зависимости (9) и (10) будут следующие. Для нашего случая расчет по зависимости (8) дает значение $\varepsilon = 0,3$ (относительное обжатие 30 %). Рассчитанные значения скоростей деформации u в зависимости от скорости прокатки v приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения скоростей деформации

Диаметр валков	$u, \text{с}^{-1}$ при $v, \text{м/с}$				
	12	14	16	18	20
$D = 0,1 \text{ м}$	113,8	132,8	151,8	170,8	189,7
$D = 0,2 \text{ м}$	80,5	93,9	107,3	120,7	134,2
$D = 0,4 \text{ м}$	56,9	66,4	75,9	85,4	94,9
$D = 0,5 \text{ м}$	50,9	59,4	67,9	76,4	84,9

Значения рассчитанных по зависимости (5) средних контактных давлений для приведенных выше условий (температура $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения средних контактных давлений

Диаметр валков	$p, \text{МПа}$ при соответствующих $u, \text{с}^{-1}$ (см. табл. 2)				
$D = 0,1 \text{ м}$	512,6	521,4	529,2	536,1	542,4
$D = 0,2 \text{ м}$	429,5	436,8	443,3	449,2	454,4
$D = 0,4 \text{ м}$	359,8	366	371,4	376,3	380,7
$D = 0,5 \text{ м}$	339,9	345,7	350,9	355,5	359,7

Момент прокатки, передаваемый двумя валками, при прокатке в клетях с горизонтальными валками рассчитывается по формуле [14]:

$$M_{np} = 2P\psi l_0, \quad (11)$$

где P – сила давления раската на валки; ψ – коэффициент плеча момента, характеризующий положение силы прокатки; l_0 – длина очага деформации (дуги контакта).

Переводя предложенную в работе [4] зависимость коэффициента плеча момента ψ от среднего контактного давления p металла на валки в систему СИ, получаем:

$$\psi = 0,00082 p - 0,41. \quad (12)$$

Коэффициент корреляции r (вероятность 0,95) в пределах $0,440 \leq r \leq 0,676$ [3].

Формула (12) с достаточной надежностью устанавливает [4] линейную зависимость между положением равнодействующей силы прокатки P и средним контактным давлением p биметалла 10ХГСН1Д+12Х18Н10Т в интервале температур 1200–850 °С.

В работе [4] приведены результаты расчетов энергосиловых параметров прокатки в уширительной клети стана 2300 для 11 проходов при $H = 200\text{--}47$ мм при температуре пакета в пределах 1200–1030 °С (было принято допущение о линейной зависимости температуры прокатки от относительной толщины раската) для полос композиции: сталь 10ХГСН1Д (70%) + сталь 12Х18Н10Т (30%).

Отметим, что необходимость в разработке режимов обжатий новых изделий или совершенствования существующих при работе на действующем прокатном стане требует проверки соответствия мощности привода требуемой мощности при прокатке.

Расчетная мощность прокатки (необходимая для осуществления деформации в данной клети) [15]:

$$N_{pac} = \frac{(M_{np} + P \cdot d \cdot \mu_n) \cdot n}{0,975\eta} + 0,08N_{\partial в}, \quad (13)$$

где P – усилие прокатки; d – диаметр шеек валков; μ_n – коэффициент трения в подшипниках, на которые опираются шейки валков; n – число оборотов валков; η – общий к. п. д привода стана, $N_{\text{дв}}$ – мощность электродвигателя привода клетки.

Общий к. п. д привода стана определяется по формуле [15]:

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3, \quad (14)$$

где η_1 – к.п.д шпинделей и муфт; η_2 – к.п.д шестеренной клетки; η_3 – к. п. д редуктора. Для трезовых шпинделей $\eta_1 = 0,96-0,98$; для универсальных шпинделей $\eta_1 = 0,94-0,98$; для шестеренной клетки $\eta_2 = 0,92-0,94$; для редуктора $\eta_3 = 0,92-0,94$ [15].

Для исследуемого биметалла 09Г2С+12Х18Н10Т зависимость температуры прокатки от относительной толщины раската также можно с большой долей вероятности принять линейной.

Общая толщина биметалла далее разбивается по проходам (отметим, что соответствующая универсальная методика также необходима). Рассчитываются энергосиловые параметры по проходам: среднее контактное давление p (зависимость (5)), зная площадь контактной поверхности F_k – усилие прокатки P (1), коэффициент плеча момента ψ (12), момент прокатки $M_{\text{пр}}$ (11), мощность прокатки $N_{\text{рас}}$ (13).

ВЫВОДЫ

Таким образом, для полученного ранее оптимального диапазона температурно-скоростных условий горячей прокатки биметалла 09Г2С+12Х18Н10Т определены значения давлений и усилий деформирования, а для остальных энергосиловых параметров процесса обоснованы необходимые зависимости и постоянные величины.

Следует принимать высокую температуру прокатки, чем выше которая, тем ниже, в соответствии с зависимостями (9) и (10), истинное сопротивление пластической деформации сталей 09Г2С и 12Х18Н10Т. В соответствии с зависимостями (9) и (10) это сопротивление в большей степени зависит от температуры и значительно меньше от относительного обжатия и скорости деформации. Можно также предположить, что первые проходы потребуют меньшего давления, чем последующие.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бэнкер Дж. Г. Промышленное применение сварки взрывом (Обзор) / Дж. Г. Бэнкер // *Автоматическая сварка*. – 2009. – № 11. – С. 49–53.
2. Математическое моделирование процессов обработки давлением / К. М. Иванов, А. В. Лясников, Л. А. Новиков, Э. В. Юргенсон; под общ. ред. А. В. Лясникова. – СПб. : ТОО «Инвентекс», 1997. – 268 с.
3. 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.
4. Исследование энергосиловых параметров прокатки биметаллических листов / Д. И. Старченко, В. И. Мазан, Т. Ф. Власов [и др.] // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1977. – № 10. – С. 76–79.
5. Голованенко С. А. Сварка прокаткой биметаллов / С. А. Голованенко. – М. : Металлургия, 1977. – 160 с.
6. Рудской А. И. Теория и технология прокатного производства : Учеб. пособие / А. И. Рудской, В. А. Лунев. – СПб. : Наука, 2005. – 540 с.
7. Быков А. А. Коррозионноустойчивый биметаллический листовой прокат / А. А. Быков. – *Сталь*. – № 6. – 1979. – С. 446–450.
8. Алчевский металлургический комбинат [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://file.liga.net/company/2170-alchevskii_metallyrgicheskii_kombinat.html.
9. Мариупольский МК им. Ильича. Продукция [Электронный ресурс] / Сайт компании METINVEST. – Режим доступа : <http://ilyichsteel.metinvestholding.com/ru/activity/products>.
10. Грудев А. П. Теория прокатки: Учебник для вузов / А. П. Грудев. – М. : Металлургия, 1988. – 240 с.
11. Бояришинов М. И. Среднее удельное давление на валки при прокатке биметалла / М. И. Бояришинов // *Сб. научных трудов МГМИ*. – Магнитогорск : Изд-во МГМИ, 1958. – Вып. 14. – С. 59–62.
12. Андреев Л. В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации металла от температуры, скорости и степени деформации / Л. В. Андреев, Г. Г. Тюленев // *Сталь*. – 1972. – № 9. – С. 825–828.

13. Коновалов Ю. В. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев – М. : Металлургия, 1986. – 430 с.
14. Василев Я. Д. Производство полосовой и листовой стали / Я. Д. Василев, М. М. Сафьян. – К. : Вища школа, 1975. – 192 с.
15. Куприн М. И. Основы теории прокатки / М. И. Куприн, М. С. Куприна. – М. : Металлургия, 1978. – 184 с.

REFERENCES

1. Bjenker Dzh. G. Promyshlennoe primenenie svarki vzryvom (Obzor) / Dzh. G. Bjenker // Avtomaticheskaja svarka. – 2009. – № 11. – S. 49–53.
2. Matematicheskoe modelirovanie processov obrabotki davleniem / K. M. Ivanov, A. V. Ljas-nikov, L. A. Novikov, Je. V. Jurgenson; pod obshh.red. A. V. Ljasnikova. – SPb. : TOO "Inventeks", 1997. – 268 s.
3. Dragobekij V. V. Modelirovanie optimal'nyh temperaturno-skorostnyh rezhimov svarki prokatkoj korrozionno-stojkogo bimetallova / V. V. Dragobekij, S. V. Galata // Visnik Shid-noukraïns'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalja. – № 2 (191). – Ch. 1. – Lugans'k : SNU imeni Volodimira Dalja, 2013. – S. 5–9.
4. Issledovanie jenergosilovyh parametrov prokatki bimetallicheskih listov / D.I. Starchenko, V.I. Mazan, T. F. Vlasov [i dr.] // Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija. – 1977. – № 10. – S. 76–79.
5. Golovanenko S. A. Svarka prokatkoj bimetallov / S. A. Golovanenko. – M. : Metallurgija, 1977. – 160 s.
6. Rudskoj A.I. Teorija i tehnologija prokatnogo proizvodstva: Ucheb. posobie / A. I. Rudskoj, V. A. Lu-nev. – SPB. : Nauka, 2005. – 540 s.
7. Bykov A.A. Korrozionnostojkij bimetallicheskij listovoj prokat / A.A.Bykov. – Stal'. – № 6. – 1979. – S. 446–450.
8. Alchevskij metallurgicheskij kombinat [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://file.liga.net/company/2170-alchevskii_metallyrgicheskii_kombinat.html.
9. Mariupol'skij MK im. Il'icha. Produkcija [Jelektronnyj resurs] / Sajt kompanii METINVEST. – Rezhim dostupa : <http://ilyichsteel.metinvestholding.com/ru/activity/products>.
10. Grudev A. P. Teorija prokatki: Uchebnik dlja vuzov / A. P. Grudev. – M. : Metallurgija, 1988. – 240 s.
11. Bojarshinov M. I. Srednee udel'noe davlenie na valki pri prokatke bimetallova / M. I. Bojarshi-nov // Sb. nauchnyh trudov MGMI. – Magnitogorsk : Izd-vo MGMI, 1958. – Vyp. 14. – S. 59–62.
12. Andrejuk L. V. Analiticheskaja zavisimost' soprotivlenija deformacii metalla ot temperatury, skorosti i stepeni deformacii / L. V. Andrejuk, G. G. Tjulenev // Stal'. – 1972. – № 9. – S. 825–828.
13. Konovalov Ju. V. Raschet parametrov listovoj prokatki. Spravochnik / Ju. V. Konovalov, A. L. Os-tapenko, V. I. Ponomarev – M. : Metallurgija, 1986. – 430 s.
14. Vasilev Ja. D. Proizvodstvo polosovoj i listovoj stali / Ja. D. Vasilev, M. M. Saf'jan. – K. : Vishha shkola, 1975. – 192 s.
15. Kuprin M. I. Osnovy teorii prokatki / M. I. Kuprin, M. S. Kuprina. – M. : Metallurgija, 1978. – 184 s.

Загорянский В. Г. – канд. техн. наук, докторант КрНУ

КрНУ – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг.

E-mail: zagor_vlad@ukr.net