УДК 669.058:669-122.4

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-2-237-16-22

В. Ф. Даненко, Л. М. Гуревич, С. А. Булаева, Г. В. Понкратова, М. А. Скалкин

**ПРОИЗВОДСТВО КРУГЛОЙ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ
С ПЛАКИРУЮЩИМ СЛОЕМ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: omd@vstu.ru

Выполнен сравнительный анализ способов изготовления круглой биметаллической заготовки для производства проволоки: сварка взрывом; совместная горячая прокатка (пакетная прокатка). Приведены результаты экспериментальных исследований сопротивления срезу и отрыву при определении прочности соединения слоев, показавшие, что надежное сцепление между слоями достигается при изготовлении заготовки обоими способами.

Ключевые слова: биметалл, сердечник, плакирующий слой, сварка взрывом, горячая прокатка, напряжение, срез, отрыв, соединение слоев, прочность, проволока.

© Даненко В. Ф., Гуревич Л. М., Булаева С. А., Понкратова Г. В., Скалкин М. А., 2020.

V. F. Danenko, L. M. Gurevich, S. A. Bulaeva, G. V. Ponkratova, M. A. Skalkin

MANUFACTURE OF A ROUND BIMETALLIC WORK WITH A FLATING LAYER FROM CORROSION-RESISTANT STEEL

Volgograd State Technical University

A comparative analysis of the methods for manufacturing a round bimetallic billet for wire production is carried out: explosion welding; joint hot rolling (batch rolling). The results of experimental studies of the shear and tear resistance when determining the strength of the connection of the layers are shown, which showed that reliable adhesion between the layers is achieved in the manufacture of the workpiece by both methods.

Keywords: bimetal, core, clad layer, explosion welding, hot rolling, stress, shear, separation, connection of layers, strength, wire.

Высокая механическая прочность биметаллической проволоки с основным слоем (сердечником) из средне- и высокоуглеродистой стали и плакирующим из стали 12X18H10T делает возможным ее применение для изготовления высоконагруженных канатов и пружин, подвергающихся обычной или усталостной коррозии [1]. Основными способами изготовления заготовки для производства биметаллической проволоки являются сварка взрывом с последующей прокаткой и совместная горячая прокатка (пакетная прокатка) [2].

Физическая природа и механизм твердофазной сварки, к которой относятся сварка пакета горячей прокаткой и сварка взрывом, большинством исследователей объясняется с помощью гипотезы топохимических реакций, основанной на физическом представлении о несовершенствах кристаллической решетки и кинетике протекания местных поверхностных химических (топохимических) реакций [3–7]. При этом основными стадиями соединения разнородных металлов в твердом состоянии являются [2]: а) образование физического контакта, сближение соединяемых веществ на расстояние действия сил межатомного взаимодействия; б) химическое взаимодействие фаз, в результате которого между системами атомов, образующих кристаллические решетки, возникает металлическая связь; в) протекание в образовавшемся соединении релаксационных процессов. В зависимости от длительности развития стадий, образование прочного соединения может произойти при импульсном характере процесса (сварка с использованием энергии взрыва) или при относительно медленном развитии стадий (совместная горячая прокатка слоев).

Целью данной работы является сравнительная оценка прочности соединения слоев в предназначенных для дальнейшего передела на проволоку биметаллических заготовках «сталь 45+сталь 12X18H10T», полученных сваркой взрывом или совместной горячей прокаткой.

Материалы, оборудование и методы исследования

Биметаллические образцы сталь 45+сталь 12X18H10T (плакирующий слой) получали из темплетов, вырезанных из биметаллических заготовок после сварки взрывом (цилиндр диаметром 50 мм) и после совместной горячей прокатки (квадрат 50×50 мм). Химический состав и механические свойства исследуемых сталей приведены в табл. 1, 2.

Химический состав сталей

Таблица 1

Материал	Содержание элементов, %								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti
Сталь 45	0,43	0,71	0,33	0,014	0,029	0,15	0,13	0,18	–
Сталь 12X18H10T	0,12	1,24	0,80	0,035	0,020	18,0	10,0	–	0,42

Механические свойства сталей

Таблица 2

Материал	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %
Сталь 45	660	380	23	50
Сталь 12X18H10T	650	310	55	52

Для получения цилиндрических биметаллических заготовок сварку взрывом проводили по ампульной схеме [6]. Высота контейнера была больше собранной системы на 50–70 мм, т. е. примерно на длину электродетонатора. Основание системы и нижнее днище контейнера устанавливали на предварительно подготовленную грунтовую площадку. Поверхности соединяемых элементов перед сваркой взрывом соответствующим образом подготавливали: очищали от окалины, ржавчины и обезжиривали.

В работе исследовали возможность получения сваркой взрывом двух типов заготовок:

1) большого диаметра ($\approx \varnothing 50$ мм), из которой дальнейшим переделом получали биметаллическую заготовку (катанку) для производства проволоки волочением;

2) малого диаметра ($\varnothing 12$ –14 мм), для получения катанки, минуя стадию прокатки.

Определение режимов сварки взрывом (СВ) для обоих типов заготовок производили на лабораторных образцах длиной 150–210 мм, где метаемым элементом являлась труба из стали 12Х18Н10Т, а внутренним элементом – круглый стержень из углеродистой стали 45. Серия опытов на лабораторных образцах позволила установить оптимальные режимы для СВ заготовок первого типа: труба из стали 12Х18Н10Т с размерами $55 \times 3,5 \times 210$ мм; стержень из стали 45 диаметром 43 мм и длиной 210 мм; зазор $h = 2,5$ мм; взрывчатое вещество (ВВ) 50 % аммонит № 6ЖВ+50 % просушенного кварцевого песка, высота заряда ВВ $H = 45$ мм.

Исходным материалом для сварки заготовок второго типа послужили: стержни из стали 45 $\varnothing 10$ –13 мм; трубы из стали 12Х18Н10Т $\varnothing 14$ мм с

толщиной стенки 0,6 и 0,9 мм, что соответствовало доле плакирования 15 и 25 % соответственно.

В результате проведения серии опытов была установлена сложность получения заготовок второго типа из элементов принятых размеров, минуя стадию горячей прокатки. Получение качественного соединения слоев при сварке заготовок второго типа затруднялось необходимостью тщательного центрирования стержня относительно трубы для обеспечения равномерности зазора h по всей длине соединения, а также неустойчивостью полета тонкой стенки в процессе метания.

Биметаллическую заготовку цилиндрической формы для последующего производства проволоки получали также способом совместной горячей прокатки на Волгоградском металлургическом заводе «Красный Октябрь». Составная заготовка с объемной долей плакирующего слоя 25 % (труба из стали 12Х18Н10Т с наружным диаметром 102 мм и толщиной стенки 6 мм и стержень из стали 45 диаметром 89 мм) показана на рис. 1.

Заготовку на первом этапе подвергали совместной горячей прокатке на среднесортном стане 450–2 на квадрат 50×50 мм [8] по существующей калибровке ромб-квадрат, преимуществом которой является менее интенсивное остывание при прокатке углов полосы и всего сечения в целом. Величина суммарного обжатия составила 68 % после семи проходов. Температура начала прокатки составляла 1150–1100 °С. Принятые режимы, как следует из данных практики [9], должны обеспечить высокую прочность сцепления слоев при дальнейшем переделе на проволоку.

Рис. 1. Составная заготовка для горячей прокатки

Обычно при пакетной прокатке проводится [10] предварительное вакуумирование пакета или заполнение его полостей инертным газом, однако опыты показали [9], что применение трубных заготовок и высоких степеней обжатия позволяет получить при непрерывной горячей

прокатке качественный биметаллический прокат и без предварительного вакуумирования. В процессе прокатки биметаллической заготовки из-за увеличения поверхности контакта окисная пленка на свариваемых поверхностях разрушалась и не препятствовала получению

прочного соединения. Отслоения лакирующего слоя от сердечника в процессе прокатки не происходило [9].

Прочность соединения слоев биметалла по ГОСТ 10885–85 проверяется испытанием на срез с определением сопротивления срезу. В ряде случаев дополнительно к испытаниям

биметаллов на срез проводят механические испытания по определению сопротивления отрыву [11]. Испытания по определению сопротивления срезу и отрыву по плоскости соприкосновения основного и лакирующего слоев проводили на машине МУП-20 в специальных приспособлениях, показанных на рис. 2.

Рис. 2. Схемы устройства для испытания образцов на отрыв (а) и срез (б):
1 – образец; 2 – прунсон; 3 – прижим; 4 – винт; 5 – корпус

Образцы устанавливали в устройство так, чтобы плоскость соприкосновения основного и лакирующего слоев воспринимала действующую на образец нагрузку при отрыве или срезе. Для облегчения точной установки образцов относительно нагрузочного инструмента предварительно выявляли границы раздела слоев на одном из торцов темплета травлением в 4 %-ном спиртовом растворе HNO_3 .

Касательные $\tau_{\text{ср}}$ и нормальные $\sigma_{\text{от}}$ напряжения, полученные при разрушении образцов под нагрузкой P_{max} , определяли по уравнениям $\tau_{\text{ср}} = P_{\text{max}}/F_{\text{ср}}$ и $\sigma_{\text{от}} = P_{\text{max}}/F_{\text{от}}$, где $F_{\text{ср}}$ и $F_{\text{от}}$ – площади поверхностей среза и отрыва, соответственно.

Определение сопротивления срезу на образцах после совместной деформации позволяло учитывать стадийность процесса прокатки. Из-

вестно [12], что на каждой из стадий прокатки закономерности деформации имеют свои особенности, связанные с неустановившимся характером процесса прокатки в период захвата и выброса полосы из валков. Общий вид переднего (1) и заднего (2) концов прокатанного квадрата сечением 50×50 мм показан на рис. 3.

Успешная дальнейшая прокатка для получения катанки возможна при условии прочного соединения слоев заготовки сечением 50×50 мм. Вследствие неустановившегося процесса прокатки схватывание слоев переднего и заднего концов раската оказывается неудовлетворительным, поэтому их необходимо удалять. С целью установления необходимой длины отрезаемых частей раската было изучено влияние неустановившегося процесса прокатки на схватывание слоев биметалла.

Темплеты для изготовления образцов вырезали на расстояниях 150, 300 и 450 мм от концов полосы. Для сопоставления результатов определения напряжений $\tau_{\text{ср}}$ в различных сечениях полосы применяли методы математической статистики [13] с использованием критериев Кохрана и Стюдента.

Для проверки гипотезы H_0 об однородности генеральных дисперсий $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_m^2$ применяли критерий Кохрана $G = S_{\text{max}}^2 / (S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_m^2)$, используемый при сравнении трех

Рис. 3. Передний (1) и задний (2) концы раската

и более выборок одинакового объема $n = 15$, где число эмпирических дисперсий $S_1^2, S_2^2, \dots, S_m^2$ соответствовало числу выборок $m \leq 6$ измерений напряжений среза в различных сечениях на заданных расстояниях от концов полосы.

Для проверки гипотезы H_0 о равенстве генеральных средних (математических ожиданий $M(X_1)=M(X_2)$) определяли критерий Стьюдента $t = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) / S_{CB} \sqrt{1/n_1 - 1/n_2}$, где $\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$ – выборочные средние для объемов выборки $n_1 = n_2 = 15$; $S_{CB} = \sqrt{\frac{S_1^2 \cdot k_1 + S_2^2 \cdot k_2}{k_1 + k_2}}$ – сводная оценка

среднеквадратического отклонения; $k_1 = k_2 = k = n - 1$ – число степеней свободы.

Результаты исследований

Результаты первичной (выборочное среднее, эмпирическая дисперсия) и вторичной (сравнение дисперсий и средних, относящихся к разным выборкам) статистической обработки экспериментальных данных по определению напряжений среза для различных поперечных сечений полосы по длине раската приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты статистической обработки значений напряжений среза для поперечных сечений по длине раската

Расстояние от концов раската l , мм	Напряжение среза $\tau_{ср}$, МПа		Эмпирическая дисперсия, S^2 (m=6)		Критерий Кохрана расчет квантиль	Эмпирическая дисперсия, S^2 (m=5)		Критерий Кохрана расчет квантиль
	Передние концы	Задние концы	Передние концы	Задние концы		Передние концы	Задние концы	
450	354	335	51,2 ²	52,7 ²	0,50 0,33	51,2 ²	52,7 ²	0,47 0,38
300	331	302	55,1 ²	81,6 ²		55,1 ²	81,6 ²	
150	153	254	168,8 ²	116,0 ²		-	116,0 ²	

Окончание табл. 3

Эмпирическая дисперсия, S^2 (m=4)		Критерий Кохрана расчет квантиль	Сводная оценка дисперсии, S_{CB}^2		Критерий Стьюдента, t расчет квантиль	
Передние концы	Задние концы		Передние концы	Задние концы	Передние концы	Задние концы
51,2 ²	52,7 ²	0,44	53,2 ²	68,7 ²	1,185	1,316
55,1 ²	81,6 ²	0,45			2,048	2,048
-	-	-	-	-	-	-

Полученные значения напряжений среза по длине раската ниже напряжений среза для компонентов биметалла: для стали 12X18H10T $\tau_{ср}=451$ МПа, для стали 45 $\tau_{ср}=489$ МПа (среднее значение из 15 испытаний).

Из табл. 3 видно, что неустановившийся процесс прокатки значительно снижает прочность соединения слоев биметалла на концевых участках раската протяженностью около 150 мм, что наиболее заметно у переднего конца раската ($\tau_{ср} = 153$ МПа), где происходит захват заготовки с ударом. По мере удаления от концов раската значения сопротивления срезу по границе раздела слоев увеличиваются и снижается разброс напряжений $\tau_{ср}$ относительно средних значений, характеризуемый дисперсией S^2 .

Проверка гипотезы H_0 об однородности дисперсий, полученных при статистической обработке значений напряжений среза $\tau_{ср}$ плакирующего слоя биметалла по длине раската, показывает, что на расстоянии $l=150$ мм от концов раската расчетное значение критерия Кохрана больше значения квантиля как для переднего (0,5>0,33 при числе выборок $m=6$), так и для заднего (0,47>0,38 при числе выборок $m=5$) концов раската (см. табл. 3), что с достоверной вероятностью $P=0,95$ говорит о неоднородности дисперсий множеств напряжений среза $\tau_{ср}$ на разных расстояниях от концов раската (невыполнение нулевой гипотезы H_0).

В свою очередь, выполнение условия $0,44<0,45$ при числе выборок $m=4$ на расстоя-

нии $l \geq 300$ мм от концов раската (см. табл. 3) говорит о том, что нулевая гипотеза H_0 должна быть принята с доверительной вероятностью $P=0,95$. Незначимость расхождения между эмпирическими дисперсиями указывает на повышение равномерности распределения напряжений среза $\tau_{ср}$ в поперечных сечениях полосы с удалением от концов раската.

Принятие гипотезы о равенстве дисперсий при числе выборок $m=4$ позволяет проверить гипотезу H_0 о равенстве генеральных средних путем вычисления критерия Стьюдента для выборочных средних $\bar{x}_1 = 354$ МПа, $\bar{x}_2 = 331$ МПа (передние концы раската) и $\bar{x}_1 = 335$ МПа, $\bar{x}_2 = 302$ МПа (задние концы раската). Из табл. 3 следует, что расчетное значение критерия Стьюдента меньше значения квантиля как для переднего ($1,185 < 2,048$), так и заднего ($1,316 < 2,048$) концов раската на расстояниях 300 и 450 мм.

Таким образом, гипотеза о равенстве генеральных средних для двух серий испытаний от-

вергается с доверительной вероятностью $P=0,95$. Различия между выборочными средними значениями напряжений среза $\tau_{ср}$ плакирующего слоя на расстояниях 300 и 450 мм от переднего и заднего концов раската значимы. Удаление переднего и заднего концов раската длиной 400 мм гарантирует в дальнейшем получение биметаллической заготовки с требуемой прочностью соединения слоев. На всех последующих переделах наблюдалось совместное деформирование слоев за счет высокой прочности их соединения [9].

Среднее значение напряжения среза $\tau_{ср}$ на расстоянии 450 мм от переднего и заднего концов раската составляет $\tau_{ср} = (354+335)/2 = 345$ МПа. Напряжение отрыва определяли на образцах, вырезанных на расстоянии 400–450 мм от концов раската. Результаты испытаний на срез и отрыв биметаллических образцов, изготовленных способом совместной горячей прокатки, и сравнение их с характеристиками биметаллических образцов, полученных сваркой взрывом, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты испытаний на срез и отрыв

Способ получения биметаллической заготовки	Прочность соединения слоев	
	Сопротивление срезу $\tau_{ср}$, МПа	Сопротивление отрыву $\sigma_{от}$, МПа
Сварка взрывом	315	615
Совместная горячая прокатка	345	550

Из таблицы следует, что максимальные значения напряжений отрыва, близкие к прочности исходных материалов (см. табл. 2), получаются при сварке взрывом. При испытании образцов разрушение происходило как по металлу сердечника, так и по зоне соединения слоев. Более низкое значение $\sigma_{от}$ образцов, вырезанных из заготовки, полученной совместной горячей прокаткой, связано с градиентом прочностных свойств на поверхности раздела слоев [14]. Разрушение полученных совместной горячей прокаткой образцов происходило как по металлу обезуглероженной зоны углеродистой стали, так и по аустениту плакирующего слоя.

Сопротивление срезу исследованных образцов превышает минимально допустимую ГОСТ 10885–85 величину 147 МПа. При этом средние значения $\tau_{ср}$ у полученных совместной горячей прокаткой образцов несколько выше, чем у изготовленных сваркой взрывом. Вероятно, это связано с волнообразным профилем границы

раздела слоев после сварки взрывом, оказывающим существенное влияние на равномерность распределения напряжений в переходной зоне биметалла и формирование зон локальной концентрации напряжений вблизи «волн». Уменьшение волнообразности профиля границы и диффузионные явления, развивающиеся в зоне соединения слоев при последующей горячей прокатке, способствуют повышению прочности на срез [2].

Выводы

1. Изготовлены опытные образцы биметаллической заготовки «сталь 45+сталь 12X18Н10Т», предназначенной для дальнейшего передела на проволоку, с применением различных способов соединения основного и плакирующего слоев: сварка взрывом и совместная горячая прокатка (пакетная прокатка).

2. Установлено достижение необходимого уровня прочности соединения слоев образцов

биметалла от заготовки диаметром 50 мм (при сварке взрывом) и сечением 50×50 мм (при совместной горячей прокатке). Напряжения отрыва $\sigma_{от}$ и среза $\tau_{ср}$ составляют в среднем: при сварке взрывом $\sigma_{от} = 615$ МПа, $\tau_{ср} = 315$ МПа; при совместной горячей прокатке $\sigma_{от} = 550$ МПа, $\tau_{ср} = 345$ МПа, то есть близки к прочности исходных материалов. Прочность соединения слоев во многом зависит от формы линии контакта границы раздела слоев и формирования у границы раздела слоев переходной зоны.

3. Производство круглых биметаллических заготовок «сталь 45+сталь 12X18H10T» способами сварки взрывом и совместной горячей прокатки обеспечивают необходимую прочность соединения слоев для дальнейшего успешного передела на проволоку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Даненко, В. Ф. Коррозионная стойкость биметаллической проволоки углеродистая сталь + сталь 12X18H10T в сажегазовой среде / В. Ф. Даненко, Л. М. Гуревич, С. А. Булаева // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 12 (175) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 36–39.
2. Тананов, А. И. Строение и свойства биметаллических материалов / А. И. Тананов, В. Д. Катихин, И. С. Гузь [и др.]. – М. : Наука. – 1975. – 124 с.
3. Голованенко, С. А. Сварка прокаткой биметаллов / С. А. Голованенко. – М. : Металлургия. – 1977. – 160 с.
4. Рудской, А. И. Теория и технология прокатного производства / А. И. Рудской, В. А. Лунев. – СПб. : Наука. – 2008. – 527 с.
5. Красулин, Ю. Л. О механизме образования соединения разнородных металлов в твердом состоянии / Ю. Л. Красулин, М. Х. Шоршоров // Физика и химия обработки материалов. – 1967. – № 1. – С. 89–97.
6. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М. : Машиностроение – 1, 2005. – 544 с.
7. Кобелев, А. Г. Материаловедение и технология композиционных материалов / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, В. Н. Чернышев, Е. В. Кузнецов : учебник. – М. : Изд. «Интермет Инжиниринг». – 2006. – 366 с.
8. Трыков, Ю. П. Прогнозирование прочностных характеристик биметаллической коррозионностойкой проволоки / Ю. П. Трыков, В. Ф. Даненко, Л. М. Гуревич, А. С. Сергиенко // Производство проката. – 2009. – № 9. – С. 29–33.
9. Гурьев, А. В. Биметаллическая катанка для производства коррозионностойкой проволоки / А. В. Гурьев, Я. А. Гохберг, Х. С. Шахпазов, А. С. Ширванян // Сталь. – 1972. – № 7 – С. 661–662.
10. Король, В. К. Основы технологии производства многослойных металлов / В. К. Король, М. С. Гильденгорн. – М. : Металлургия. – 1970. – 237 с.
11. Новые способы определения прочности сцепления компонентов биметалла. – М. : Информация ЦНИИЧМ, 1967. – (серия № 7), № 7–8. – 40 с.
12. Грудев, А. П. Теория прокатки / А. П. Грудев. – М. : Металлургия. – 1988. – 240 с.
13. Мельниченко, А. С. Статистический анализ в металлургии и материаловедении : учебник / А. С. Мельниченко. – М. : Изд. Дом МИСиС. – 2009. – 268 с.
14. Даненко, В. Ф. О влиянии переходной зоны на процесс высокотемпературной ползучести биметалла углеродистая сталь + сталь 12X18H10T / В. Ф. Даненко, Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, Г. В. Понкратова // Производство проката. – 2012. – № 11. – С. 23–28.