

Терентьев Е.В., Марченков А.Ю., Слива А.П., Гончаров А.Л. Повышение конструкционной прочности разнородных сварных соединений сплава 36НХТЮ ЭП517 за счет оптимизации геометрических параметров шва // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 63–72. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.08

Terentyev E.V., Marchenkov A.Yu., Sliva A.P., Goncharov A.L. 36NKHTYU alloy to EP517 steel dissimilar welded joints structural strength increase due to optimization of weld seam dimensions. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 63–72. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.08

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 20, № 3, 2018
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.08
УДК 621.791.722; 620.18; 620.17

Е.В. Терентьев, А.Ю. Марченков, А.П. Слива, А.Л. Гончаров

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия

**ПОВЫШЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА 36НХТЮ И СТАЛИ ЭП517 ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШВА**

Представлены результаты исследований влияния геометрических параметров швов разнородных сварных соединений стали ЭП517 и сплава 36НХТЮ на прочностные свойства сварных соединений. Описана технология электронно-лучевой сварки пластин толщиной 6 мм из сплава 36НХТЮ и стали ЭП517. Приведены результаты металлографических исследований и механических испытаний сварных соединений с различной шириной шва, которые показали, что структура и свойства металла шва на образцах с различной шириной шва практически идентичны. При этом испытание сварных соединений растяжением демонстрирует значительно большее временное сопротивление по сравнению с временным сопротивлением металла шва, причем чем меньше ширина шва, тем прочнее сварное соединение, что объясняется контактным упрочнением. Кроме того, применение термической обработки после сварки позволяет дополнительно повысить прочностные свойства металла шва и зоны термического влияния со стороны сплава 36НХТЮ за счет выделения упрочняющей γ -фазы. Показана возможность повышения временного сопротивления сварного шва до 93 % от временного сопротивления стали ЭП517 (как менее прочной) за счет термообработки и уменьшения ширины шва. Для определения временного сопротивления и условного предела текучести различных зон сварного соединения безобразцовым способом был разработан метод определения характеристик механических свойств вдавливанием индентора.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, конструкционная прочность, металл шва, прочность металла шва, сплав 36НХТЮ, сталь ЭП517, контактное упрочнение, микроструктура, вдавливание, параметры шва.

E.V. Terentyev, A.Yu. Marchenkov, A.P. Sliva, A.L. Goncharov

National research university “Moscow Power Institute”, Moscow, Russian Federation

**36NKHTYU ALLOY TO EP517 STEEL DISSIMILAR WELDED JOINTS STRUCTURAL STRENGTH
INCREASE DUE TO OPTIMIZATION OF WELD SEAM DIMENSIONS**

The results of weld seams impact research on dissimilar EP517 steel to 36NKHTYU alloy weld joints strength properties are performed. The electron-beam welding technology features of 6 mm thick plates made of specified materials are described. The results of metallographic studies and mechanical tests of weld joints with various seam widths are presented, which showed that the structure and properties of weld metal do not depend on seam width. Herewith, the tension tests demonstrate a higher ultimate stress of welded joints in comparison with the ultimate stress of weld metal. Moreover, the smaller the joint width, the stronger the welded joint, that is explained by contact hardening phenomenon. In addition, the use of heat treatment after welding allows to further increase the strength properties of the weld joint due to the strengthening γ -phase formation in weld metal and heat affected zone of the 36NKHTYU alloy. The possibility of increasing the ultimate stress of weld joints up to 93% of the EP517 steel ultimate stress value due to reduction of the seam width and subsequent heat treatment application is shown. A method of yield stress and ultimate stress evaluation of welded materials and their weld joints by indentation test is developed.

Keywords: electron beam welding, constructional strength, metal seam, strength of weld metal, alloy 36НХТЮ, steel ЭП517, contact hardening, microstructure, indentation, seam parameters.

Введение

Широкое применение сварных конструкций в различных отраслях промышленности обусловлено в первую очередь возможностью получения деталей сложной формы из сплавов, прошедших

требуемую термическую и механическую обработку, благодаря чему имеющих высокие прочностные характеристики. Причем для некоторых сплавов удается добиться равнопрочности металла шва, зоны термического влияния (ЗТВ) и основного металла за счет оптимизации сварочного термическо-

го цикла, легирования металла шва и проведения последующей термической обработки. Однако в ряде случаев, например при сварке дисперсионно-твердеющих сплавов или сплавов в нагартованном состоянии, металл шва и зоны термического влияния претерпевает значительные структурные изменения, которые приводят к снижению прочности по сравнению с основным металлом. Снижение прочности металла шва, как правило, связано со следующими факторами: выделением вторичных избыточных фаз в виде крупных включений в металле шва на этапе кристаллизации, что приводит к уменьшению концентрации легирующих компонентов в твердом растворе и снижению потенциала повышения прочности при старении; коагуляцией упрочняющих фаз в ЗТВ и металле шва под действием сварочного термического цикла [1]; снижением плотности дислокаций в сварном соединении из-за нагрева при сварке сплавов в нагартованном состоянии [2]. Последующая закалка всей конструкции не всегда допустима из-за габаритов конструкции и деформаций, возникающих при термообработке сварной конструкции. Для конструкций, содержащих сварные соединения из разнородных сплавов, закалка чаще всего недопустима в связи с опасным перераспределением внутренних напряжений в зоне сварного соединения [3]. Также последующая обработка давлением сварного соединения возможна только в редких случаях.

В то же время известен эффект контактного упрочнения конструкций, содержащих мягкую тонкую прослойку, причем в некоторых случаях, несмотря на низкую прочность материала прослойки, прочность соединения достигала прочности основного металла [4]. В роли мягкой прослойки в сварном соединении выступает шов и (или) ЗТВ. Известно [4–8], что для повышения прочности сварного соединения с мягкой прослойкой необходимо стремиться минимизировать относительную ширину прослойки, равную отношению ширины мягкого шва и ЗТВ к толщине стыка. С этой точки зрения наиболее перспективны лучевые способы сварки – электронно-лучевая и лазерная, обеспечивающие отношение толщины свариваемого стыка к ширине шва 10:1 и выше [9, 10].

Например, в работе [11] представлена технология электронно-лучевой сварки сварного комбинированного банджа высокоскоростного турбогенератора (рис. 1), содержащего сегменты из стали ЭП517 (15X12Н2МВФАБ) и сегменты из сплава 36НХТЮ. Бандаж предназначен для фиксации постоянных магнитов из редкоземельных материалов, а чередование парамагнитных и ферромагнитных сегментов банджа необходимо для снижения немагнитного зазора на полюсных башмаках.

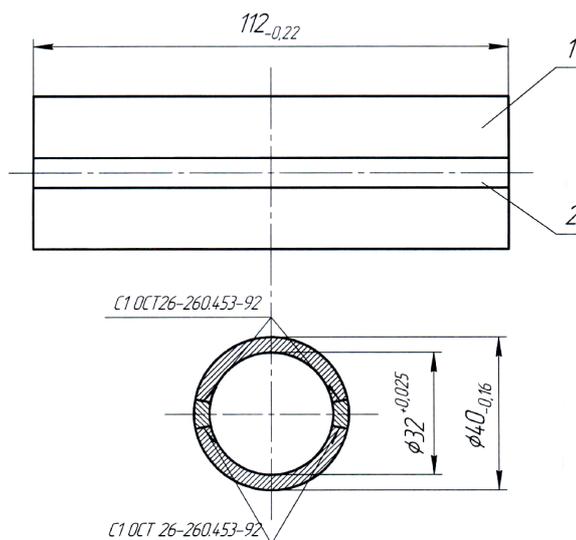


Рис. 1. Конструкция банджа ротора высокоскоростного турбогенератора: 1 – ферромагнитный сегмент (сталь ЭП517); 2 – парамагнитный сегмент (сплав 36НХТЮ)

Стоит отметить, что частота вращения ротора достигает 120 тыс. об/мин, поэтому к сварным соединениям предъявлены высокие требования по механическим свойствам. В данной работе, согласно результатам испытаний образцов растяжением, отношение временного сопротивления сварных соединений к временному сопротивлению стали ЭП517 (как менее прочного из свариваемой пары) после сварки составило 0,75, а после старения при температуре 650 °С в течение 3 ч – 0,88. Указанные значения временного сопротивления сварного соединения нельзя считать прочностными характеристиками металла шва, поскольку неизвестен вклад контактного упрочнения в прочностные свойства шва, при этом для проведения прочностных расчетов сварных конструкций необходимо знать характеристики прочности именно металла шва. Кроме того, проблема повышения прочности сварного соединения комбинированного банджа остается актуальной, причем в этих условиях решение указанной проблемы за счет использования эффекта контактного упрочнения наиболее перспективно.

Вместе с тем задача определения характеристик прочности металла шва для последующего использования полученных значений в расчетах на прочность также является актуальной. Применение для этой цели метода растяжения в этом случае весьма затруднительно, особенно с учетом малой ширины шва. Весьма перспективно в данных условиях применение метода безобразцового определения характеристик прочности металла, основанного на вдавливании индентора [12]. За счет высокой локальности метода и возможности изменения параметров испытания в зависимости от фактической

ширины сварных швов данный метод является весьма эффективным как с точки зрения информативности, так и по трудозатратам и материалоемкости.

Таким образом, целями данной работы являются исследование влияния геометрических параметров швов разнородных сварных соединений стали ЭП517 и сплава 36НХТЮ на прочностные свойства сварных соединений, а также разработка безобразцового метода определения прочностных характеристик металла шва.

Методика

Для получения сварных соединений использовали пластины толщиной 6 мм из стали ЭП517 и сплава 36НХТЮ. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) пластин проводилась на установке АЭЛТК-12-244, технические характеристики которой приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики электронно-лучевой установки АЭЛТК-12-244

№ п/п	Параметр	Единица измерения	Значение
1	Ускоряющее напряжение	кВ	60
2	Диапазон значений изменения тока электронного пучка	мА	1–650
3	Максимальная мощность электронного пучка	кВт	40
4	Рабочее расстояние между пушкой и деталью	мм	100–500
5	Объем вакуумной камеры	м ³	12
6	Рабочее давление	мм рт. ст.	10 ⁻⁴

ЭЛС проводилась в нижнем положении со свободным формированием корня. Исходя из данных работы [13–16], скорость сварки, обеспечивающую свободное формирование корня шва, выбрали равной 60 м/ч. Значение тока пучка определяли расчетным путем, после чего экспериментально проводили подбор тока фокусирующей линзы и корректировали ток электронного пучка. Шов № 1 был получен без применения развертки, затем для уменьшения ширины шва при сварке шва № 2 использовали продольную пилообразную развертку, используемую в работах [17, 18]. При сварке шва № 3 для увеличения ширины шва использовали поперечную развертку. Широкий шов необходим для изготовления образца на растяжение из металла шва. Режимы ЭЛС представлены в табл. 2.

Таблица 2

Режимы ЭЛС пластин из стали ЭП517 и сплава 36НХТЮ

№ п/п	Скорость сварки $V_{св}$, м/ч	Ускоряющее напряжение U , кВ	Ток луча, I_l , мА	Ток фокусирующей линзы I_f , мА	Частота развертки f , мм	Амплитуда развертки A , мм
1	60	60	85	780	–	–
2			90	780	170	1,5 (продольная)
3			120	780	170	3 (поперечная)

Полученные сварные соединения использовали для металлографических исследований и механических испытаний, причем часть пластин исследовали сразу после сварки, а остальную после термической обработки. Термическую обработку проводили в муфельной печи Nabertherm P330 по режиму отпуск 650 °С с выдержкой 3 ч и охлаждением на воздухе.

Подготовку микрошлифов выполняли по стандартной методике. Вырезка заготовок для микрошлифов проводилась на отрезном станке Buehler AbrasiMatic 300. Затем отрезанные фрагменты были запрессованы в компаунд EpoMet на станке для горячей запрессовки Buehler SimpliMet 1000. Запрессованные образцы подвергались шлифованию на станке Buehler EcoMet 250, а затем полировке с использованием алмазной пасты и полировальных суспензий. Электрохимическое травление осуществляли в 10%-ном растворе щавелевой кислоты в воде. Для исследования микроструктуры сварного соединения использовали оптический микроскоп Zeiss Observer Z1m.

Распределение твердости по Виккерсу HV2 по сечению сварного соединения определяли на автоматизированном твердомере Instron Tukon 2500 согласно ГОСТ 2999–75 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу» и ГОСТ 6996–66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств».

Испытания по определению характеристик прочности и пластичности свариваемых материалов и сварных соединений растяжением проводились на универсальной испытательной машине Instron 5982 в режиме растяжения со скоростью деформирования $V_{деф} = 2$ мм/мин. Испытания для определения механических свойств свариваемых материалов 36НХТЮ и ЭП517 проводили в соответствии с ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытания на растяжение» на плоских образцах номинальной толщиной $h = 5$ мм. Для определения

прочностных характеристик металла шва из сварного шва № 3 вырезали образец в продольном направлении и провели испытания в соответствии с п. 4 ГОСТ 6996–66. Для определения временного сопротивления исследуемых сварных соединений проводились испытания сварных соединений на статическое растяжение согласно п. 8 ГОСТ 6996–66. Образцы на растяжение вырезались в поперечном относительно сварного шва направлении таким образом, чтобы все сварное соединение, включая металл шва, зону термического влияния и основной металл, находилось в пределах рабочей части образца. В данной работе испытания разнородных сварных соединений из сплавов 36НХТЮ и ЭП517 проводились на плоских образцах номинальной толщиной $h = 5$ мм и цилиндрических образцах номинальным диаметром рабочей части $d = 3$ мм.

Помимо указанных выше методов исследования сварных соединений в работе был применен безобразцовый способ определения механических свойств вдавливанием индентора. Данный метод основан на вдавливании в заданный участок сварного соединения индентора в виде шара с последующим определением специальных характеристик твердости и пересчетом их на показатели других механических свойств (временное сопротивление, предел текучести и др.). Процедура определения специальных характеристик твердости регламентирована ГОСТ 22761–77 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия» и ГОСТ 22762–77 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара», разработанными в МЭИ. Эти же ГОСТы регламентируют определение данным способом временного сопротивления и предела текучести углеродистых сталей и легированных сталей перлитного класса.

Однако, если речь идет об определении характеристик прочности на сталях других структурных классов или на сплавах на основе других металлов, реализация данного способа требует проведения предварительных испытаний, включающих получение для каждого из исследуемых материалов диаграммы вдавливания индентора, сопоставление диаграмм вдавливания с диаграммами растяжения и установление с их помощью взаимосвязей между специальными характеристиками твердости и прочности. Такие исследовательские испытания были проведены на микрошлифах для каждого из свариваемых материалов (36НХТЮ и ЭП517) и их сварных соединений.

Результаты

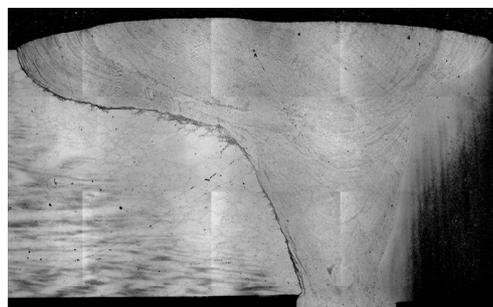
Металлографические исследования сварных соединений стали ЭП517 и сплава 36НХТЮ показали отсутствие внутренних дефектов типа пор и трещин в исследуемых сечениях. Панорамные снимки швов представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, форма и ширина шва значительно отличаются в зависимости от параметров режимов сварки. Несимметричность шва, по всей видимости, связана с несовершенством электронно-оптической системы используемой пушки, а также различием физических свойств свариваемых металлов. Ширина шва в центральной части составляет 1,4 мм в шве № 1, 1,1 мм в шве № 2 и 3,4 мм в шве № 3.



а



б



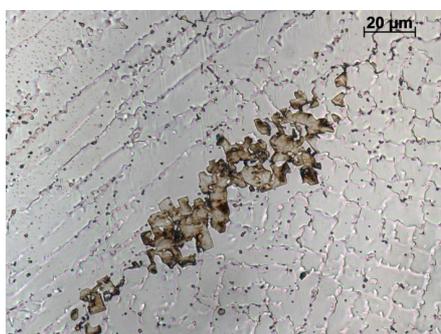
в

Рис. 2. Макрошлифы сварных соединений:
а – шов № 1; б – шов № 2; в – шов № 3

Сталь ЭП517 мартенситного класса с карбидным упрочнением в зоне термического влияния претерпевает мартенситное превращение, а стареющий сплав 36НХТЮ в зоне термического влияния образует пересыщенную γ' -фазу. Металл шва после сварки имеет структуру пересыщенного аустенита с включениями карбидов и интерметаллидов преимущественно по границам зерен (рис. 3, а). При термической обработке как в металле шва, так и в ЗТВ со стороны 36НХТЮ происходит прерывистое выделение упрочняющей γ' -фазы (рис. 3, б). При этом стоит отметить, что структура металла шва во всех 3 образцах идентична. Это также подтверждается испытаниями сварных соединений вдавливанием индентора.



а



б

Рис. 3. Микроструктура металла шва до (а) и после (б) термической обработки при температуре 650 °С в течение 3 ч, $\times 1000$

На рис. 4 показаны распределения в поперечных сечениях сварных соединений значений твердости по Виккерсу. Как видно из рисунка, уровень твердости практически не зависит от ширины шва. В то же время следует отметить более высокую твердость в корне шва по сравнению с вершиной, что можно объяснить различными условиями охлаждения в процессе сварки. Как видно из рис. 4, высокие скорости охлаждения в ЗТВ под действием сварочного термического цикла приводят к закалке, которая со стороны стали ЭП517 приводит к повышению твердости за счет мартенситного превращения, а со стороны сплава 36НХТЮ – к снижению твердости.

Результаты испытаний образцов, вырезанных из свариваемых материалов, металла шва, сварных соединений без термической обработки и после термической обработки (ТО) представлены в табл. 3, в которой приведены средние значения основных характеристик прочности и пластичности. Разрушение всех сварных образцов как в состоянии после сварки, так и после термической обработки проходило по металлу шва. На рис. 5 представлены диаграммы растяжения свариваемых материалов, металла шва и сварных соединений.

Для разработки безобразцового метода определения механических свойств вдавливанием индентора для каждого из свариваемых материалов и металла сварных швов проводились исследовательские испытания, которые заключались в получении диаграмм вдавливания шарового индентора в координатах «нагрузка вдавливания – диаметр восстановленного отпечатка», перестроении этих диаграмм в координаты «среднее контактное напряжение НВ – средняя контактная деформация», сопоставлении их с соответствующими диаграммами растяжения и установлении корреляционных связей между характеристиками твердости.

По результатам испытаний вдавливанием было установлено, что как для сплава 36НХТЮ, так и для стали ЭП517 максимальное контактное напряжение HV_{max} достигается при степени нагружения $F/D^2 \approx 30$ кГ/мм², где F – нагрузка вдавливания, а D – диаметр индентора, что соответствует условиям определения твердости по Бринеллю согласно ГОСТ 9012–59. Для металла шва HV_{max} достигается при степени нагружения $F/D^2 \approx 42$ кГ/мм², что косвенно свидетельствует о более высокой пластичности металла шва в сравнении со свариваемыми материалами.

Сопоставление результатов испытаний вдавливанием индентора и растяжением образцов представлено в табл. 4. Для определения характеристик прочности по характеристикам твердости для каждого из материалов определяли коэффициент $k_{0,2}$, равный отношению предела текучести $\sigma_{0,2}$ к твердости на пределе текучести $HV_{0,2}$, и коэффициент k_b , равный отношению временного сопротивления σ_b к максимальной твердости HV_{max} .

Таким образом, по результатам испытаний были установлены корреляционные связи между характеристиками твердости и прочности, с использованием которых можно по результатам 2 вдавливаний индентора с заданными параметрами испытания определить временное сопротивление и предел текучести для основного металла или металла сварного шва.

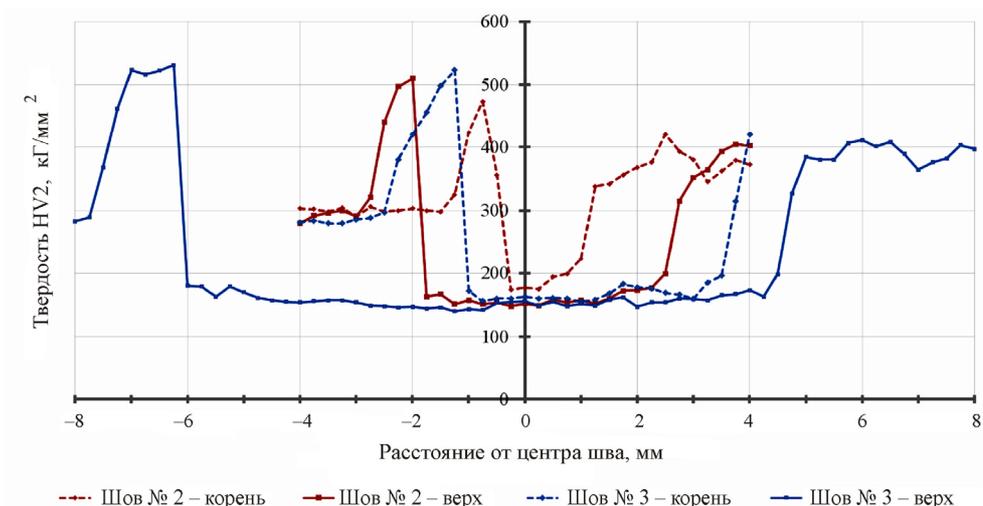


Рис. 4. Графики распределения значений твердости по Виккерсу HV2 по поперечным сечениям сварных соединений после сварки

Таблица 3

Механические свойства свариваемых материалов и их сварных соединений

Группа образцов	Тип образца	Относительная ширина шва b/δ , или d/δ	Временное сопротивление σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предельное равномерное удлинение $\delta_{рав}$, %
36НХТЮ	Плоский	–	1237	990	10
ЭП517	Плоский	–	987	797	7
Металл шва	Цилиндрический	–	553	340	23
Сварное соединение	Плоский	0,42	742	520*	2*
		0,29	795	500*	2*
	Цилиндрический	0,43	754	575*	2*
Сварное соединение после ТО	Плоский	0,42	869	640*	5*
		0,29	915	532*	11*

Примечание. * Указанные характеристики не определяются согласно ГОСТ 6996–66. Представленные в таблице значения носят оценочный характер.

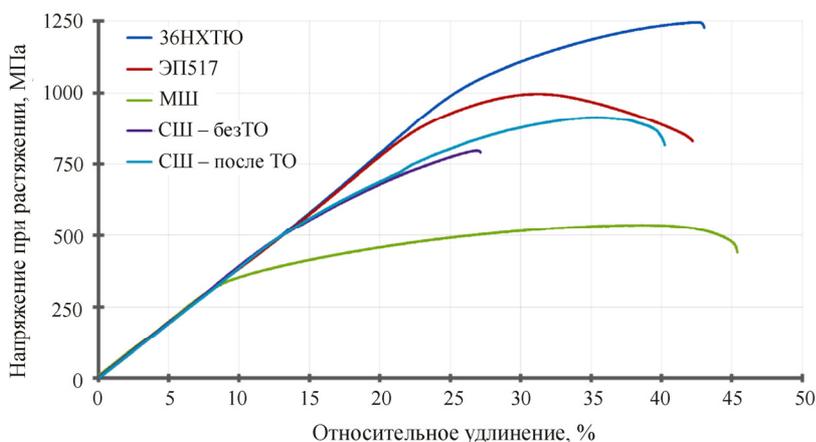


Рис. 5. Диаграммы растяжения для свариваемых металлов (36НХТЮ и ЭП517), металла шва (МШ) и сварных соединений с относительной шириной шва 0,29 до (СШ – без ТО) и после термической обработки (СШ – после ТО)

Таблица 4

Сопоставление результатов испытаний вдавливанием индентора и растяжением образцов для свариваемых материалов и металла сварных швов

Исследуемый материал	Вдавливание индентора		Растяжение образцов		Корреляционные связи	
	Твердость на пределе текучести $HB_{0,2}$, МПа	Максимальная твердость HB_{max} , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление σ_b , МПа	$k_{0,2}$	k_b
36НХТЮ	2492	3537	990	1237	0,397	0,349
ЭП517	2154	2840	797	987	0,370	0,347
Металл шва	961	1511	340	553	0,354	0,365

Таблица 5

Результаты определения характеристик твердости металла швов № 1–3 вдавливанием индентора

Образец	Ширина шва в центральной части, мм	Результаты испытаний вдавливанием индентора		Расчет характеристик прочности	
		Твердость на пределе текучести $HB_{0,2}$, МПа	Максимальная твердость HB_{max} , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление σ_b , МПа
Шов № 1	1,4	990	1545	350	564
Шов № 2	1,1	969	1530	343	558
Шов № 3	3,4	961	1511	340	553

Метод вдавливания индентора применялся также для определения механических свойств сварных швов № 1–3, исследуемых в работе. На микрошлифах сварных соединений в металле шва было выполнено по 2 вдавливания, в результате которых определили твердость на пределе текучести $HB_{0,2}$ и максимальную твердость HB_{max} . Результаты представлены в табл. 5, из которой видно, что механические свойства металла швов № 1–3 идентичны и фактически не зависят от ширины шва.

Обсуждение результатов

Металл шва, формируемый при сварке стали ЭП517 со сплавом 36НХТЮ, имеет сравнительно низкие прочностные свойства, причем закалка из жидкого состояния позволяет повысить прочностные свойства за счет последующего старения на значительную величину. Несмотря на возможность некоторого повышения прочности металла шва за счет оптимизации параметров термообработки и регулирования степени проплавления, в целом повышение прочности металла шва до уровня основного металла не представляется возможным из-за различных механизмов упрочнения свариваемых материалов.

В то же время известный эффект контактно-упрочнения позволяет существенно повысить временное сопротивление сварного соединения

с узкими швами. Дело в том, что при поперечном деформировании сварного соединения с мягкой прослойкой (швом) шов первым будет вовлечен в пластическую деформацию, развитию которой сразу же станут препятствовать прилегающие участки более прочной зоны металла, так как в этот момент они продолжают работать в области упругих деформаций. Сдерживание пластической деформации мягкой прослойки связано с тем, что коэффициент поперечной деформации при пластической работе материала заведомо превышает значение коэффициента поперечной деформации при упругой работе [19]. Это приводит к возникновению сложного объемного напряженного состояния в мягкой прослойке, при котором металл в ней приобретает более высокое значение интенсивности деформаций, что в конечном счете существенно влияет на прочность и запас пластичности. Особенно сильно сдерживание пластической деформации проявится, когда в мягкой зоне металла должна образоваться шейка, что связано с быстрым нарастанием поперечных деформаций. Но в результате сдерживания образование шейки в мягком металле произойдет с задержкой во времени и при большем уровне средних растягивающих напряжений, что будет означать повышение прочности мягкой прослойки [19, 20]. Согласно данным работы [4], временное сопротивление конструкции, содержащей мягкую прослойку, при относительной ширине прослойки

менее 0,1 равно временному сопротивлению основного металла, т.е. конструкция равнопрочная, а при относительной ширине прослойки более 1 прочность конструкции определяется временным сопротивлением мягкой прослойки. Исходя из этого, а также из данных табл. 3–5, построили график зависимости временного сопротивления от относительной ширины прослойки (рис. 6). Как видно из графика, экспериментальные данные хорошо согласуются с данными работы [4]. Таким образом, можно предположить, что дальнейшее повышение прочности сварного соединения возможно за счет уменьшения ширины шва, для чего необходимо совершенствовать технологию и оборудование для ЭЛС.

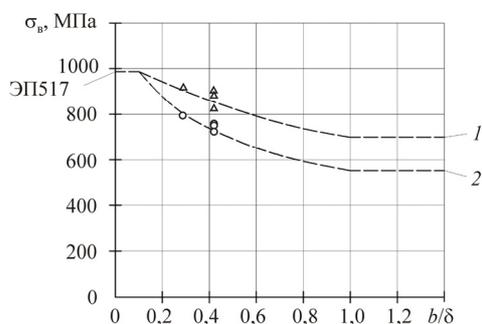


Рис. 6. Зависимость временного сопротивления сварного соединения от относительной ширины шва: 1 – металл шва после старения; 2 – металл шва после сварки

Разработанный в рамках данной работы безобразцовый метод контроля механических свойств вдавливанием индентора показывает стабильные результаты по оценке механических характеристик металла шва, что позволит определять прочностные свойства сварных конструкций с различными геометрическими параметрами мягкого шва.

Анализ полученных результатов испытаний вдавливанием 3 исследуемых сварных швов (№ 1–3) совместно с результатами испытаний растяжением образцов со сварными швами наглядно демонстрирует эффект контактного упрочнения. Прочность металла швов идентична и не зависит от ширины шва ($\sigma_b = 553 \dots 564$ МПа), в то время как конструкционная прочность образцов с узкими швами, определенная растяжением, оказалась существенно выше ($\sigma_b = 742 \dots 795$ МПа).

Выводы

Исследуемые сварные соединения, полученные электронно-лучевой сваркой, характеризуются малой шириной шва и небольшой относительной шириной швов, что создает благоприятные

условия для интенсивного контактного упрочнения шва при деформировании металла растяжением. Причем уменьшение относительной ширины шва с 0,42 до 0,29 позволило повысить временное сопротивление сварных соединений с 742 до 795 МПа (с 75 до 81 % от временного сопротивления основного металла) после сварки и с 869 до 915 МПа (с 88 до 93 % от временного сопротивления основного металла) после термической обработки.

Разработан метод определения характеристик механических свойств свариваемых материалов и металла сварных швов вдавливанием индентора. Использование метода позволяет без изготовления разрывных образцов определять характеристики твердости и прочности металла швов по результатам 2 вдавливания индентором.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00335).

Список литературы

1. Исследование влияния скорости ЭЛС на химический состав, структуру и свойства сварных соединений сплава Д16 / В.К. Драгунов, Е.В. Терентьев, А.Л. Гончаров, А.Ю. Марченков // Сварочное производство. – 2015. – № 12. – С. 17–21.
2. Ерофеев В.В., Игнатъев А.Г. Обоснование режимов электронно-лучевой сварки изделий оболочкового типа из нагартованных сплавов АМг6Н и АМг6НПП // Вестник ЮУрГУ. Машиностроение. – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 53–61.
3. Создание сварных комбинированных конструкций в энергетике: учеб. пособие. Ч. 1. Физические процессы при сварке разнородных металлов / В.К. Драгунов, А.Л. Гончаров, Е.В. Терентьев, А.Ю. Марченков; под ред. В.К. Драгунова. – М.: Вече, 2015. – 176 с.
4. Шахматов М.В., Ерофеев В.В., Коваленко В.В. Технология изготовления и расчета сварных оболочек. – Уфа: Полиграфкомбинат, 1999. – 272 с.
5. Влияние степени механической неоднородности на статическую прочность сварных соединений / О.А. Бакши, В.В. Ерофеев, Ю.И. Анисимов, М.В. Шахматов, С.И. Ярославцев // Сварочное производство. – 1983. – № 4. – С. 1.
6. Дильман В.Л., Остсемин А.А., Ерошкина Т.В. Прочность механически неоднородных сварных соединений стержней арматуры // Вестник машиностроения. – 2008. – № 9. – С. 13–16.
7. Дильман В.Л., Остсемин А.А. Напряженное состояние и статическая прочность пластичной прослойки при плоской деформации // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 4. – С. 38–48.
8. Айметов С.Ф., Айметов Ф.Г. Прочность стыковых сварных соединений, ослабленных мягкой прослойкой, при действии изгибающей нагрузки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Металлургия. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 107–112.

9. Патон Б.Е., Лесков Г.И., Нестеренков В.М. Динамические модели каналов проплавления при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. – 1988. – № 1. – С. 1–6.
10. Особенности получения качественных сварных швов при электронно-лучевой сварке высокопрочных сталей большой толщины / В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, Г.М. Младенов, Т.В. Ольшанская, // Автоматическая сварка. – 2012. – № 2(706). – С. 47–50.
11. EBW technology of combined bandage of high-speed electric machine rotor / V.K. Dragunov, A.P. Sliva, E.V. Terentyev, A.L. Goncharov, A.Yu. Marchenkov, M.A. Portnov // 13th International Conference on Electron Beam Welding “E+E”. – 2018. – Vol. 53, № 5–6. – P. 112–118.
12. Матюнин В.М. Индентирование в диагностике механических свойств материалов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 288 с.
13. Влияние скорости сварки на формирование шва при ЭЛС со сквозным проплавлением / Е.В. Терентьев, В.К. Драгунов, А.П. Слива, А.В. Щербаков // Сварочное производство. – 2014. – № 2. – С. 25–29.
14. Effect of welding speed on weld formation in electron beam welding with continuous penetration / Y.V. Terentyev, V.K. Dragunov, A.P. Sliva, A.V. Scherbakov // Welding International. – 2015. – Vol. 29, № 2. – P. 150–154.
15. Определение скорости сварки при ЭЛС больших толщин со сквозным проплавлением / В.К. Драгунов, Е.В. Терентьев, А.П. Слива, А.Л. Гончаров, А.Ю. Марченков // Сварочное производство. – 2016. – № 4. – С. 20–25.
16. Determination of welding speed in electron beam welding of thick components with continuous penetration / V.K. Dragunov, E.V. Terentev, A.P. Sliva, A.L. Goncharov, A.Y. Marchenkov // Welding International. – 2017. – Vol. 31, № 4. – P. 307–311.
17. Слива А.П. Повышение качества сварных соединений при ЭЛС с осцилляцией электронного пучка сплавов алюминия со сквозным проплавлением // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии: II Междунар. конф., 14–17 ноября 2017 г. – М.: Изд-во МЭИ, 2017. – С. 506–520.
18. Акопьянц К.С. Нестеренков В.М. Назаренко О.К. Электронно-лучевая сварка сталей толщиной до 60 мм с продольными колебаниями луча // Автоматическая сварка. – 2002. – № 9. – С. 3–5.
19. Влияние неоднородности механических свойств различных зон сварного стыкового соединения на работу соединения в упругопластической стадии деформации / В.И. Берг, М.Н. Чекардовский, С.В. Якубовская, В.С. Торопов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2–3. – С. 28.
20. Бакши О.А. Об учете фактора механической неоднородности сварных соединений при испытании на растяжение // Сварочное производство. – 1985. – № 7. – С. 32–34.
- khimicheskii sostav, strukturu i svoystva svarnykh soedinenii splava D16 [Research of influence of speed of ELS on the chemical composition, structure and properties of welded compounds of D16 alloy]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2015, no. 12, pp. 17–21.
2. Erofeev V.V., Ignat'ev A.G. Obosnovanie rezhimov elektronno-luchevoi svarki izdelii obolochkovogo tipa iz nagartovannykh splavov AMg6N i AMg6NPP [Justification of the modes of electron beam welding of products of shell type from nagartovanny alloys AMG6N and AMG6NPP]. *Vestnik IuUrGU. Mashinostroenie*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 53–61.
3. Dragunov V.K., Goncharov A.L., Terent'ev E.V., Marchenkov A.Iu. Sozdanie svarnykh kombinirovannykh konst-ruktssii v energetike: uchebnoe posobie [Creation of the welded combined designs in power]. Ch. 1. Fizicheskie protsessy pri svarke raznorodnykh metallov. Ed. V.K. Dragunova. Moscow: Veche, 2015, 176 p.
4. Shakhmatov M.V., Erofeev V.V., Kovalenko V.V. Tekhnologiia izgotovleniia i rascheta svarnykh obolochek [Manufacturing techniques and calculation of welded covers]. Ufa: Poligrafkombinat, 1999, 272 p.
5. Bakshi O.A., Erofeev V.V., Anisimov Iu.I., Shakhmatov M.V., Iaroslavtsev S.I. Vliianie stepeni mekhanicheskoi neodnorodnosti na staticheskuiu prochnost' svarnykh soedinenii [Influence of degree of mechanical heterogeneity on the static durability of welded connections]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1983, no. 4, pp. 1.
6. Dil'man V.L., Ostsemin A.A., Eroshkina T.V. Prochnost' mekhanicheski neodnorodnykh svarnykh soedinenii sterzhnei armatury // Vestnik mashinostroeniia. – 2008. – № 9. – S. 13–16.
7. Dil'man V.L., Ostsemin A.A. Napriazhennoe sostoianie i staticheskaiia prochnost' plastichnoi prosloiki pri ploskoi deformatsii [Durability of mechanically non-uniform welded connections of cores of fittings]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin*, 2005, no. 4, pp. 38–48.
8. Aimetov S.F., Aimetov F.G. Prochnost' stykovykh svarnykh soedinenii, oslablennykh miagkoi prosloikoi, pri deistvii izgibaiushchei nagruzki [Durability of the butt welded connections weakened by soft layer, at action of the bending loading]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Metallurgii*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 107–112.
9. Paton B.E., Leskov G.I., Nesterenkov V.M. Dinamicheskie modeli kanalov proplavleniia pri elektronno-luchevoi svarke [Dynamic models of channels of pro-melting at electron beam welding]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1988, no. 1, pp. 1–6.
10. Belen'kii V.Ia., Trushnikov D.N., Mladenov G.M., Ol'shanskaia T.V. Osobennosti polucheniia kachestvennykh svarnykh shvov pri elektronno-luchevoi svarke vysokoprochnykh staley bol'shoi tolshchiny [Features of receiving qualitative welded seams at electron beam welding high-strength staly big thickness]. *Avtomaticheskaia svarka*, 2012, no. 2(706), pp. 47–50.
11. Dragunov V.K., Sliva A.P., Terentyev E.V., Goncharov A.L., Marchenkov A.Yu., Portnov M.A. EBW technology of combined bandage of high-speed electric machine rotor. *13th International Conference on Electron Beam Welding “E+E”*, 2018, vol. 53, no. 5–6, pp. 112–118.

References

1. Dragunov V.K., Terent'ev E.V., Goncharov A.L., Marchenkov A.Iu. Issledovanie vliianiia skorosti ELS na

12. Matiunin V.M. Indentirovanie v diagnostike mekhanicheskikh svoystv materialov [Indentirovaniye in diagnostics of mechanical properties of materials]. Moscow: Izdatel'skii dom MEI, 2015, 288 p.

13. Terent'ev E.V., Dragunov V.K., Sliva A.P., Shcherbakov A.V. Vliianie skorosti svarki na formirovanie shva pri ELS so skvoznym proplavleniem [Influence of speed of welding on formation of a seam at ELS with through pro-melting]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2014, no. 2, pp. 25–29.

14. Terentyev Y.V., Dragunov V.K., Sliva A.P., Scherbakov A.V. Effect of welding speed on weld formation in electron beam welding with continuous penetration. *Welding International*, 2015, vol. 29, no. 2, pp. 150–154.

15. Dragunov V.K., Terent'ev E.V., Sliva A.P., Goncharov A.L., Marchenkov A.Yu. Opredelenie skorosti svarki pri ELS bol'shikh tolshchin so skvoznym proplavleniem [Determination of speed of welding at ELS of big thickness with through pro-melting]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2016, no. 4, pp. 20–25.

16. Dragunov V.K., Terentev E.V., Sliva A.P., Goncharov A.L., Marchenkov A.Y. Determination of welding speed in electron beam welding of thick components with continuous penetration. *Welding International*, 2017, vol. 31, no. 4, pp. 307–311.

17. Sliva A.P. Povyshenie kachestva svarykh soedinenii pri ELS s ostsiillatsiei elektronno go puchka splavov aliuminiia so skvoznym proplavleniem [Improvement of quality of welded connections at ELS with oscillation of an electron beam of alloys of aluminum with through pro-melting]. *Elektronno-luchevaia svarka i smezhnye tekhnologii: II mezhdunarodnaia konferentsiia*, 2017. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2017, pp. 506–520.

18. Akop'iants K.S., Nesterenkov V.M., Nazarenko O.K. Elektronno-luchevaia svarka stali tolshchiny do 60 mm s prodol'nymi kolebaniiami luchia [Electron beam welding with a staly thickness up to 60 mm with longitudinal fluctuations of a beam]. *Avtomaticheskaiia svarka*, 2002, no. 9, pp. 3–5.

19. Berg V.I., Chekardovskii M.N., Iakubovskaia S.V., Toropov V.S. Vliianie neodnorodnosti mekhanicheskikh svoystv razlichnykh zon svarnogo stykovogo soedineniia na rabotu soedineniia v uprugoplasticheskoi stadii deformatsii [Influence of heterogeneity of mechanical properties of various zones of welded butt connection on work of connection in an elasto-plastic stage of deformation]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2015, no. 2–3, pp. 28.

20. Bakshi O.A. Ob uchete faktora mekhanicheskoi neodnorodnosti svarykh soedinenii pri ispytanii na rastia-

zhenie [About accounting of a factor of mechanical heterogeneity of welded connections at test on stretching]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1985, no. 7, pp. 32–34.

Получено 15.08.18

Об авторах

Терентьев Егор Валериевич (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт»; e-mail: TerentyevYV@mpei.ru.

Марченков Артем Юрьевич (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт»; e-mail: Art-marchenkov@yandex.ru.

Слива Андрей Петрович (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт»; e-mail: Slivaap@mpei.ru.

Гончаров Алексей Леонидович (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт»; e-mail: GoncharovAL@mpei.ru.

About authors

Egor V. Terentyev (Moscow, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology of Metals, National Research University "Moscow Power Institute"; e-mail: TerentyevYV@mpei.ru.

Artem Yu. Marchenkov (Moscow, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology of Metals, National Research University "Moscow Power Institute"; e-mail: Art-marchenkov@yandex.ru.

Andrei P. Sliva (Moscow, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology of Metals, National Research University "Moscow Power Institute"; e-mail: Slivaap@mpei.ru.

Alexei L. Goncharov (Moscow, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Associate Professor Technology of Metals, National Research University "Moscow Power Institute"; e-mail: GoncharovAL@mpei.ru.