

# УПРАВЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ

М. ФИДЛЕР, А. ПЛОЦНЕР, Б. РУТЦИНГЕР, В. ШЕРЛЯЙТНЕР

Fronius International GmbH, Froniusplatz 1, A-4600, Wels, Австрия

E-mail: Scherleitner.Wolfgang@fronius.com

Все большее применение получают высокопрочные стали при производстве сварных конструкций во многих областях промышленности. Время охлаждения металла в диапазоне от 800 до 500 °С является ключевым фактором, который в значительной степени определяет свойства сварных соединений высокопрочных сталей. Для сварки в полевых условиях время охлаждения может контролироваться с помощью тепловложения, даже когда в качестве основных материалов используются стали разной толщины. Современные дуговые процессы с пониженным тепловложением позволяют одновременно увеличивать скорость сварки и обеспечивать стабильность уровня прочности соединений за счет оптимизации возможностей оборудования. В данной статье проведено сравнение влияния традиционных процессов дуговой сварки в защитных газах (GMAW), таких процессов, как сварка с короткой дугой, импульсный процесс и другие новые процессы, на свойства металла швов. В работе сделаны практические выводы и даны рекомендации, которые могут обеспечить оптимизацию процессов сварки. Библиогр. 5, табл. 5, рис. 5.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, высокопрочные стали, тепловложение, структура

Высокопрочные стали используются во многих областях промышленности для снижения массы изделий и сокращения затрат на материалы. Типичными областями применения этого вида сталей являются передвижные краны, морские буровые платформы, бетононасосы и трубопроводы под давлением.

Преимуществом ТМСП (термомеханической контролируемой обработки) мелкозернистых сталей является достижение оптимальной прочности и вязкости. В целом, высокопрочные стали используются для уменьшения толщины стенки, что приводит к снижению массы и упомянутой выше экономии затрат. Из-за низкого содержания углерода эти стали имеют хорошую свариваемость, однако при этом должны быть соблюдены рекомендации изготовителей стали и сварочных материалов.

Температурно-временной градиент при сварке и применение соответствующего химического состава материалов имеют ключевое значение при обеспечении механических свойств высокопрочных сталей. Температурно-временной градиент дается в описании также как время  $t_{8/5}$ . Это время играет решающее значение при формировании структуры шва и зоны термического влияния, так как характеризует продолжительность остывания металла в диапазоне температур от 800 до 500 °С.

На  $t_{8/5}$  оказывают влияние такие параметры, как толщина материала, форма шва, одиночный валик или последовательность слоев, температура подогрева и тепловложение. Тепловложение мож-

но целенаправленно контролировать, выбирая соответствующий процесс сварки. В данной статье проведено сравнение процессов GMAW с одной проволокой и тандемных процессов GMAW и их влияния на механические свойства. В частности, проведен обзор традиционных процессов GMAW, таких как процесс с короткой дугой, модифицированных процессов, импульсный процесс GMAW, РМС (импульсный многофункциональный контроль), LSC (контроль низкого уровня разбрызгивания) и тандемный процесс, включая СМТ Twin (процесс переноса холодного металла с двумя приводами подачи проволоки) и Time Twin.

**Сравнение сварочных процессов.** *Процесс с короткой дугой.* Процесс с короткой дугой имеет непрерывную подачу проволоки. Регулируемыми параметрами процесса являются сварочное напряжение и сварочный ток. Последовательность данного цикла можно описать следующим образом: проволока расплавляется дугой и образуется капля. В начале короткого замыкания капля контактирует с поверхностью изделия. Чтобы прервать короткое замыкание и повторно зажечь дугу, необходимо высокий ток. Поверхностное натяжение сварочной ванны и высокий ток создают так называемый пинч-эффект, который отделяет каплю на конце проволоки. При пиковом значении тока дуга зажигается повторно. Высокий ток короткого замыкания может спровоцировать обширное разбрызгивание [1].

*Импульсный процесс GMAW.* Этот процесс доказал свою эффективность и известен в промыш-

ленности в течение многих лет, что стало возможным благодаря электронным регулируемым источникам питания. Отделение капли контролируется материалом и защитным газом в зависимости от импульса тока. Свободный перенос материала при коротком замыкании позволяет практически избежать образования брызг. Жидкая ванна шва и расплавленный конец сварочной проволоки обусловлены уровнем базового тока (фазой тока заземления). За счет каждого повышения тока (пикового тока) возрастает также и плотность тока, при этом будет возрастать сила Лоренца, а капля будет двигаться к изделию [2].

*LSC (контроль низкого уровня разбрызгивания)*. Как уже упоминалось, процесс короткой дуги позволяет переносить материал при высоком пике тока, что может спровоцировать более высокое количество брызг. Высокие показатели измерения и контроля в процессе LSC позволяют снизить ток в источнике питания перед прерыванием короткого замыкания (рис. 1).

*PMС (импульсный многофункциональный контроль)*. РМС является дальнейшей разработкой импульсного процесса GMAW. В источник сварочного тока были интегрированы новые функции, такие как стабилизатор проплавления и длины дуги, которые были реализованы благодаря новому алгоритму и более высокой расчетной скорости. Сварочная платформа TPS/i обеспечивает эффективный и более легкий контроль дуги. Обычные сварочные машины используют постоянную скорость подачи проволоки. Если вылет сварочной проволоки увеличивается и сварочное напряжение поддерживается на том же уровне,

сварочный ток будет снижен. Это приводит к снижению проплавления, а вероятность несплавления становится выше. «Стабилизатор проплавления» помогает обнаруживать изменения в длине вылета и проводить регулирование в соответствии с изменениями (с регулировкой скорости подачи проволоки). Постоянный сварочный ток помогает поддерживать проплавление на постоянном уровне на протяжении всей длины валика (рис. 2).

Изменения в геометрии валика или разные скорости сварки приводят к изменению длины дуги.

Стабилизатор длины дуги обеспечивает контролируемое короткое замыкание во время отделения капли при постоянной длине дуги [3].

*Тандемный процесс GMAW Time Twin*. Тандемный сварочный процесс Time Twin использует два отдельных сварочных электрода, которые расплавляются в одной сварочной ванне. Благодаря разделению электрических потенциалов, можно реализовать различные комбинации дуги. Это позволяет регулировать скорость сварки и наплавки.

*СМТ Twin*. СМТ (перенос холодного металла) главным образом был разработан как процесс соединения тонкого листового металла в автомобилестроении. Основным преимуществом процесса СМТ является низкое тепловложение, которое обусловлено тем, что проволока выталкивается из жидкой ванны шва соответственно при более низком сварочном токе. СМТ Twin является модернизированным тандемным процессом. Аналогично тандемному процессу, при СМТ Twin применяются два цифровых контролируемых источника питания, которые полностью независимы друг от друга. Система обеспечивает максимальное уве-

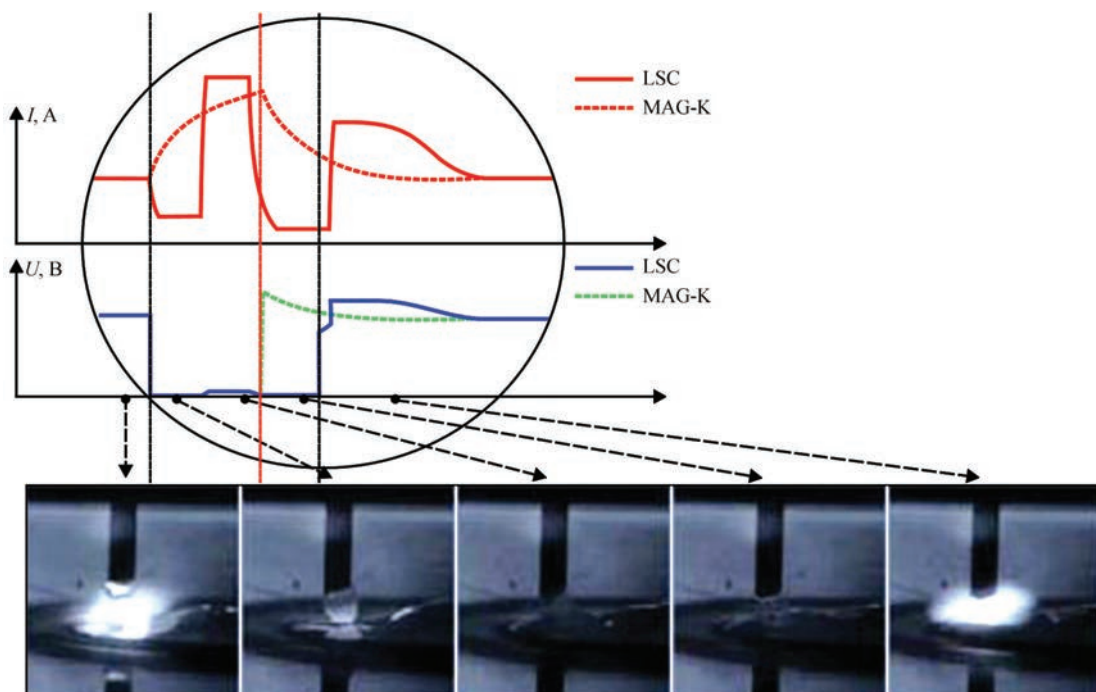


Рис. 1. Диаграмма тока и напряжения для процесса LSC и MAG-K

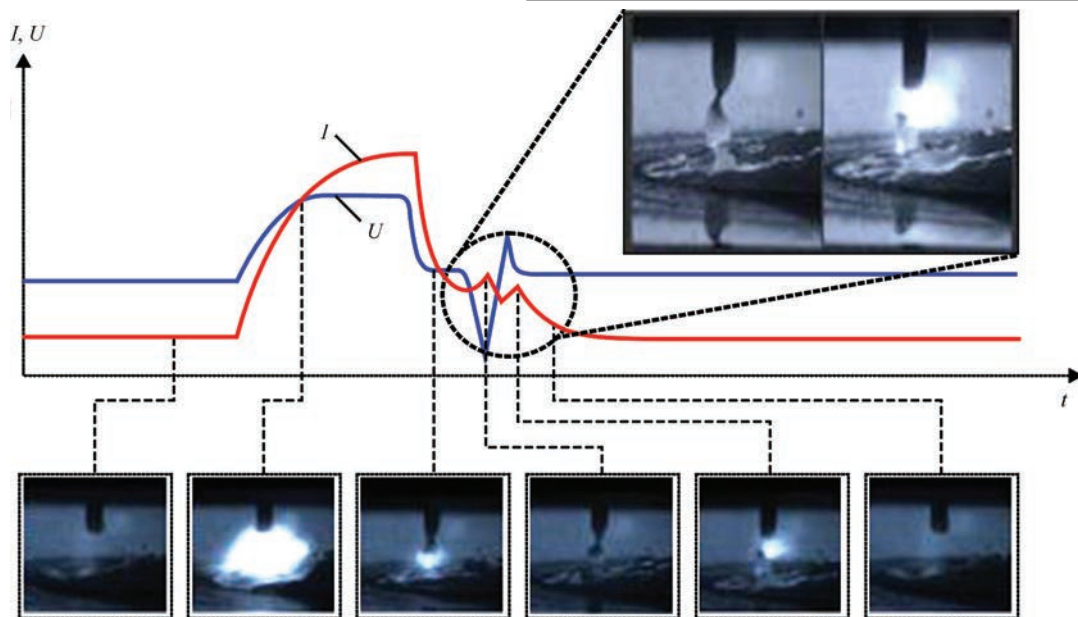


Рис. 2. Диаграмма тока и напряжения для процесса PMC

личение скорости подачи проволоки и позволяет использовать две дуги СМТ или различные комбинации дуг. Преимуществом СМТ Twin является стабильность дуги и пониженное тепловложение.

**Металлургические аспекты.** Новые оптимизированные сварочные процессы создаются за счет модифицированных электрических параметров, при которых основное значение имеют напряжение и ток сварки. Их влияние приводит к изменению тепловложения на единицу длины шва (при постоянной скорости сварки) и, следовательно, влияет на механические свойства. Применение современных сварочных процессов облегчает контроль ванны шва и обеспечивает более высокую стабильность дуги, что приводит к более высокой скорости сварки. В результате обеспечиваются более широкие возможности процесса относительно управления тепловложением и, следовательно, временем охлаждения  $t_{8/5}$ .

С применением модифицированного дугового процесса (при соответствующей задаче сварки) можно ожидать различные механические свойства. Процесс LSC, например, снижает сварочный ток перед прерыванием короткого замыкания, что приводит к более низкому тепловложению по сравнению с обычным процессом с короткой дугой. Такой эффект обеспечивает более низкое тепловложение и сокращает время охлаждения. Соответственно, прочность повышается, а пластичность снижается за счет получения микроструктуры повышенной прочности. Инженеру-сварщику следует руководствоваться существующими знаниями об этих условиях.

**Опытная установка.** Для достижения соответствующих результатов сварки была выбрана стандартизированная сварочная установка. Сварку проводили роботом в положении РА в защит-

ном газе M21 (82 % аргона и 18 %  $\text{CO}_2$ ). В качестве основного материала была использована пластина из стали alform 700-M. В качестве сварочного материала были использованы металлургическая порошковая проволока Böhler alform® 700-MS и сплошная проволока Böhler alform® 700-IG диаметром 1,2 мм. Проводилось исследование наплавленного металла и V-образных соединений, температура между проходами для всех испытаний доводилась до 150 °С.

Исследуемые пластины для наплавленных металлических образцов имели размеры 500×150 мм и толщину 20 мм. Угол открытия 10° использовался с зазором 16 мм — все края были буферизированы аналогичным материалом.

Для V-образных соединений размеры были 700×150×20 мм. Угол скоса был выбран 60°, корневой зазор 2 мм, использована керамическая подложка. Все исследуемые пластины были сварены в шесть слоев, V-образные соединения были сварены с 10 валиками, наплавленный металл состоит из 12 валиков.

**Результаты исследований.** *Наплавленный металл.* Установку и разработку опытных образцов выполняли в соответствии со стандартом EN ISO 18276 и EN ISO 16834 — в случае стыковой сварки с адаптацией к роботизированной сварке. Особое внимание было уделено применению практических параметров также при повторном получении соединений. Из наплавленного металла были взяты образцы для испытаний на продольное растяжение и испытаний на ударную вязкость. На ударную вязкость образец испытывали в диапазоне от комнатной температуры до -40 °С.

На рис. 3 показана подготовка кромок и эскизы вырезки образцов наплавленного металла.

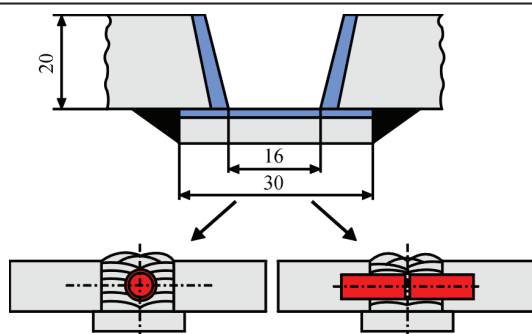


Рис. 3. Подготовка кромок и эскизы вырезки из наплавленного металла

Все образцы соответствовали минимальным требованиям в соответствии со стандартом. Из-за различий в химическом составе между сплошной проволокой (Boehler alform® 700-IG) и металлическими порошковыми проволоками, более высокий уровень прочности достигается при использовании сплошных проволок (табл. 1). Значения вязкости следуют общей металлургической корреляции, а именно, что более высокая прочность приводит к более низким значениям вязкости. Тем не менее, оптимизированные процессы GMAW одной проволокой для обоих изделий (применяя сплошную проволоку и металлические порошковые проволоки) показывают более высокие значения вязкости по отношению к модификации прочности. Однородные параметры сварки и однородные условия затвердевания (зарождение и осадка) могут иметь положительное влияние на эти условия.

В табл. 1 приведены результаты испытаний наплавленного металла на растяжение, а также связь между процессом сварки и тепловложением. По практическим соображениям технический термин тепловложение был использован без учета термического КПД. В этом отношении для расчета были использованы документированные параметры источника питания. Следовательно, это сделало возможным использовать практический режим, которому пользователю легко придерживаться.

Таблица 1. Прочностные свойства при испытаниях на растяжение и тепловложение при сварке

Процесс	Сварочная проволока	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	Тепловложение, кДж/мм
	alform 700-MC	736	787	1,27
PMC	alform 700-IG	785	830	1,26
	alform 700-MC	776	817	1,22
CMT-Twin	alform 700-IG	877	926	1,11
	alform 700-MC	786	828	1,05
Time-Twin	alform 700-IG	814	857	1,26
	alform 700-MC	778	814	1,19
Импульсный	alform 700-IG	761	817	1,57
	alform 700-MC	726	769	1,35
LSC	alform 700-IG	767	814	1,51
	alform 700-MC	727	772	1,37

В связи с противоречивыми дискуссиями на счет исследования реального тепловложения, особенно в отношении эффективности дуги при подаче проволоки при тандемном процессе, этот вопрос был также снят.

Лучшая смачиваемость металлической порошковой проволоки обеспечила более высокие скорости сварки, что привело к снижению тепловложения. Однако добавление шихты вызвало более низкие значения прочности, которые нельзя компенсировать.

В связи с соответствующими характеристиками процесс CMT Twin обеспечивает низкое тепловложение, что приводит к более высоким уровням прочности.

В табл. 2 представлены результаты испытаний наплавленного металла на ударную вязкость. Как упоминалось выше, более высокая прочность (особенно при процессе CMT Twin) обеспечивает более низкие значения вязкости. Оптимизированные процессы с одной проволокой склонны к лучшим показателям вязкости и прочности.

*V-образное соединение.* Процедура исследования значений прочности образцов в продольном и поперечном направлении сварки, вырезку образцов на продольное и поперечное растяжение и анализ вязкости в металле шва, а также распределение твердости по всему шву.

На рис. 4 представлены последовательность слоев и схема вырезки образцов для испытаний.

Предел текучести и прочности на растяжение металла шва исследовали с помощью продольных образцов на растяжение в соответствии с аналогичной методикой, которая описана для наплавленного металла. Для соединений применяли аналогичные параметры с практической адаптацией (по последовательности слоев). При этом значительных несоответствий не наблюдалось.

В табл. 3 представлены результаты испытаний на растяжение для V-образных соединений. Согласно уже обсуждаемой разнице в последова-

Таблица 2. Ударная вязкость наплавленного металла

Процесс	Сварочная проволока	Ударная вязкость, Дж		
		20 °C	0 °C	-40 °C
Стандартный	alform 700-IG	118	113	64
	alform 700-MC	137	126	97
PMC	alform 700-IG	127	118	89
	alform 700-MC	131	124	95
CMT-Twin	alform 700-IG	82	77	69
	alform 700-MC	103	96	79
Time-Twin	alform 700-IG	130	123	98
	alform 700-MC	108	104	86
Импульсный	alform 700-IG	133	131	94
	alform 700-MC	142	138	98
LSC	alform 700-IG	128	116	77
	alform 700-MC	152	141	108

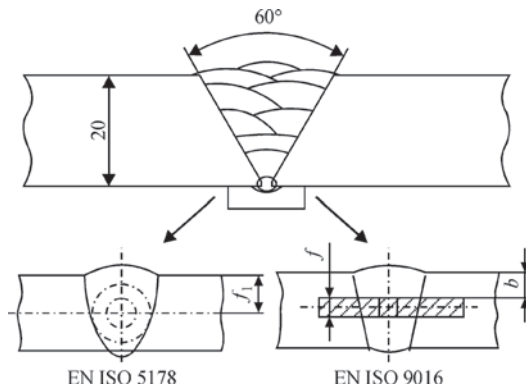


Рис. 4. Последовательность слоев для получения V-образных соединений и схема вырезки образцов

Таблица 3. Прочностные свойства сварных V-образных соединений и тепловложение при сварке

Процесс	Сварочная проволока	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	Тепловложение, кДж/м
Стандартный	alform 700-IG	714	872	1,32
	alform 700-MC	712	806	1,25
PMC	alform 700-IG	693	895	1,24
	alform 700-MC	751	855	1,10
CMT-Twin	alform 700-IG	833	888	0,97
	alform 700-MC	824	902	0,79
Time-Twin	alform 700-IG	798	873	1,13
	alform 700-MC	757	837	1,14
Импульсный	alform 700-IG	739	877	1,42
	alform 700-MC	718	818	1,26
LSC	alform 700-IG	715	854	1,38
	alform 700-MC	701	810	1,27

Таблица 4. Значения ударной вязкости

Процесс	Сварочная проволока	Ударная вязкость, Дж		
		20 °С	0 °С	-40 °С
Стандартный	alform 700-IG	170	156	101
	alform 700-MC	134	123	79
PMC	alform 700-IG	161	128	87
	alform 700-MC	116	107	69
CMT-Twin	alform 700-IG	128	113	90
	alform 700-MC	98	95	72
Time-Twin	alform 700-IG	127	113	74
	alform 700-MC	113	104	78
Импульсный	alform 700-IG	139	122	67
	alform 700-MC	137	120	80
LSC	alform 700-IG	160	141	83
	alform 700-MC	146	137	82

тельности слоев скорость сварки была слегка увеличена, поэтому тепловложение было снижено. Разбавление основным материалом является ключевым фактором, который существенно влияет на механические свойства. По сравнению с наплавленным металлом, тепловложение было ниже, однако предел текучести был также снижен. Предел прочности на растяжение соответствовал ожидаемой аналогии в соответствии с модифицированным тепловложением, поэтому уменьшение коэффициента текучести ( $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ ) в шве реализуемо.

Таблица 5. Предел прочности на растяжение сварных V-образных соединений и место разрушения

Процесс	Сварочная проволока	$\sigma_B$ , МПа	Место разрушения
Стандартный	alform 700-IG	832	ОМ
	alform 700-MC	816	НМ
PMC	alform 700-IG	898	НМ
	alform 700-MC	870	НМ
CMT-Twin	alform 700-IG	858	ОМ
	alform 700-MC	864	ОМ
Time-Twin	alform 700-IG	870	ОМ
	alform 700-MC	838	ОМ
Импульсный	alform 700-IG	846	НМ
	alform 700-MC	818	НМ
LSC	alform 700-IG	818	НМ
	alform 700-MC	839	НМ

ОМ — основной металл; НМ — наплавленный металл.

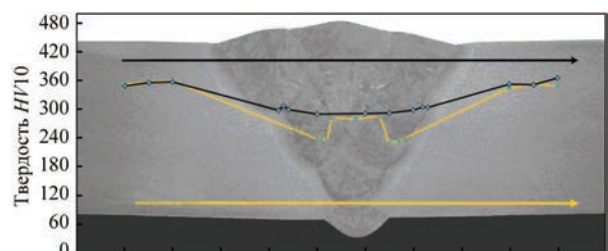


Рис. 5. Распределение твердости поперечного соединения (шов–корень–верхний валик), для Boehler alform® 700-IG, выполненного процессом PMC

Оптимизированных результатов можно достичь благодаря применению согласованной системы между основным материалом и сварочными материалами (система сварки alform®) [4, 5].

В частности, значения вязкости в стыковой сварке (кроме разбавления основного материала), в основном зависели от последовательности слоев. Сравнение между наплавленным металлом и V-образными соединениями не рассматривалось из-за многомерных изменений параметров. Согласно данным исследований (табл. 4), развернутая корреляция со сварочным процессом невозможна. Для того, чтобы получить сопоставимые результаты, в данном случае необходима будет другая испытательная установка с аналогичной последовательностью слоев. Важно то, что при каждом процессе была достигнута ударная вязкость 27 Дж при -40 °С. В табл. 5 приведены оценки прочности на растяжение в поперечном направлении, а также место разрушения. Место разрушения зависит от самой низкой локальной устойчивости в шве или в основном материале. Во всех случаях прочность разрушения превышает 800 МПа. На рис. 5 показан профиль твердости по сварному шву. Одна поперечная линия твердости оценивалась для корня, другая — для верхнего слоя. В любом случае твердость металла шва всегда составляла около HV10 — 280, что является ниже значений основного материала.

### Выводы

Современные дуговые процессы не только упрощают управление ими (для сварщика), но также и расширяют возможности для управления механическими свойствами (для инженера). Основное внимание в данной работе было сосредоточено на практических результатах. С точки зрения сварщика, более высокой скорости сварки можно достичь при более легком контроле дуги, который влияет на тепловложение.

В частности, V-образные соединения, которые находятся в самом центре внимания у инженеров-сварщиков, по сравнению с наплавленным металлом демонстрируют улучшение коэффициента текучести. Это означает, что более низкое значение коэффициента текучести обеспечивает более высокую надежность компонентов.

Необходимо отметить однородные свойства, касающиеся прочности и вязкости во время применения современных дуговых процессов. Можно отметить улучшенную вязкость (при той же прочности), из чего следует вывод об однородном те-

чении кристаллизации. Следовательно, современные дуговые процессы не только предоставляют преимущества сварщику (облегченный контроль процессов), но также и положительно влияют на формирование микроструктуры металла шва.

Прошедшая тщательные испытания сварочная система allform<sup>®</sup>, таким образом, может иметь более универсальное применение с высокой степенью надежности и безопасности. Современные источники питания расширяют возможности сварки.

1. Matthes K.-J. Schweißtechnik Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen / K.-J. Matthes, E. Richter, 2008.
2. Der CMT-Prozess – Ein neuer Prozess in der Fügetechnik / J. Artelsmair, J. Bruckner, J. Kazmaier.
3. Roßmann F. J. Neue Impulse für kontrolliertes und schnelles Schweißen / F. J. Roßmann.
4. Rutzinger B. Influence of the welding process to the dilution rate, of weld overlays on unalloyed steel using the weld consumable ERNiCrMo<sub>3</sub> (Alloy 625) / B. Rutzinger.
5. Allform welding system – the world's first system for high-strength welded structures / M. Fiedler, R. Rauch, R. Schnitzer [et al.] // 68th IIW annual assembly & international conference, Helsinki.

Поступила в редакцию 17.03.2016

## IV Международная научно-техническая конференция «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ»

4–7 октября 2016 г.

г. Краматорск

### УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Донбасская государственная машиностроительная академия (ДГМА) проводит IV Международную научно-техническую конференцию «Сварка и родственные технологии: перспективы развития».

### НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- ◆ Прогрессивные технологии сварки, наплавки, пайки, резки, нанесения покрытий и обработки поверхностей
- ◆ Математическое, физическое, имитационное моделирование, компьютерные и информационные технологии в сварке и родственных процессах
  - ◆ Теория процессов сварки и наплавки
  - ◆ Физико-химические процессы при сварке и родственных процессах
    - ◆ Материаловедение в сварке и родственных процессах
- ◆ Перспективные конструкционные, сварочные и наплавочные материалы
  - ◆ Механизация и автоматизация в сварке и родственных процессах
- ◆ Оборудование и источники питания в сварке и родственных процессах
  - ◆ Ресурс и надежность сварных конструкций
- ◆ Техническая диагностика и контроль качества в сварке и родственных технологиях
  - ◆ Энерго- и ресурсосбережение в сварке и родственных технологиях
    - ◆ Экологические проблемы процессов сварки и наплавки
      - ◆ Нормативная база сварочного производства
      - ◆ Сварочные и родственные технологии в медицине
  - ◆ Нанотехнологии, наноматериалы в сварочных и родственных процессах
    - ◆ Нейросетевые технологии в сварочных и родственных процессах
- ◆ Подготовка и повышение квалификации кадров для сварочного производства и смежных областей
  - ◆ История развития сварки и родственных процессов

**Контакты:** Донбасская государственная машиностроительная академия (ДГМА), ул. Шкадинова, 72, 84313, г. Краматорск, Донецкая обл., Украина, факс: (+38-0626) 41-63-15. E-mail: sp@dgma.donetsk.ua; goldenmih@ukr.net; www.dgma.donetsk.ua