



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ ВНЕДРЕНИЯ В ЗОНЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ

О. Д. СМЛЯН, д-р техн. наук, академик НАН Украины **С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО**,
Г. К. ХАРЧЕНКО, д-р техн. наук, **И. В. ЗЯХОР**, канд. техн. наук,
Е. И. БУТКОВА, **А. В. НИКОЛЬНИКОВ**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучено распределение примесей внедрения (кислорода и водорода) в соединениях стали 10Г2ФБ, полученных сваркой трением. Применена методика и аппаратура для локального масс-спектрального анализа с использованием лазерного зонда. Экспериментально установлен характер распределения примесей внедрения в зоне соединения при различных видах сварки трением — конвенционной и инерционной.

Ключевые слова: сварка трением, конвенционная сварка трением, инерционная сварка трением, зона соединения, примеси внедрения, локальное содержание, зоны пластической и упругой деформации

В работах [1, 2] для оценки локального содержания и распределения газообразующих примесей внедрения (ПВ) (водорода, кислорода, азота и углерода) в соединениях, полученных сваркой давлением, применяли методику и аппаратуру для локального масс-спектрального анализа с использованием электронно-лучевого [1] и лазерного [2] зондов. Установлено, что при сварке взрывом пластин из стали Ст3 в зоне соединения содержание водорода, кислорода и углерода возрастает [1]. В работе [2] показано, что в соединениях шпилек из сплава АМг6, полученных ударной конденсаторной сваркой, в зоне соединения также наблюдается повышение содержания этих примесей. В качестве основного механизма поглощения твердым телом примесей в этом случае рассматривалась сорбция металлом газов из зазора между свариваемыми заготовками.

Представляет интерес изучение распределения ПВ в соединениях, полученных другими способами сварки давлением, например, сваркой трением (СТ), для которой характерно формирование соединения в твердой фазе. Имеющиеся на торцах заготовок пленки оксидов разрушаются и вытесняются из стыка в процессе нагрева и пластической деформации заготовок. Формирование соединения происходит при приложении давления после прекращения вращения заготовок. Публикаций, касающихся определения локального содержания и распределения ПВ в зоне соединений, полученных СТ, нам обнаружить не удалось. Однако известно [1, 2], что при других способах сварки давлением локальные скопления ПВ отрицательно сказываются на механических свойствах соединений.

Цель данной работы состояла в изучении распределения кислорода и водорода в соединениях, полученных СТ. Исследования выполняли на установке ЭХО-4М на сварных образцах из стали 10Г2ФБ. Содержание ПВ в основном металле в среднем составило $1,5 \text{ млн}^{-1}$ ($1,3 \cdot 10^{-4}$ мас. %) [Н] и $0,003$ мас. % [О]. В ходе исследований измеряли значения ионных токов H^+ , O^+ после их экстракции из твердого тела в результате импульсного локального плавления металла в заданной точке образца сфокусированным лучом лазера. Интенсивность этих сигналов соответствовала локальному содержанию ПВ в металле. Регистрацию значений ионных токов осуществляли с помощью масс-спектрометра МХ7301. Длительность импульса облучения составляла 5 мс, мощность импульса — 7,5 Дж, максимальная температура в точке облучения — 8000 К.

Сваривали стержни диаметром 18 мм из стали 10Г2ФБ. Образцы вытачивали из сегментов трубы с толщиной стенки 18,5 мм. Сварку стержней выполняли на модернизированной сварочной установке конструкции ИЭС им. Е. О. Патона СТ-120, реализующей технологию СТ с регулируемым торможением [3], при которой можно изменять термомеханические условия формирования соединений. Сварные соединения получены двумя способами СТ, отличающимися термическим и деформационным циклом сварки, — конвенционной (КСТ) и инерционной сваркой (ИСТ). Циклограммы изменения во времени τ таких технологических параметров, как частота вращения n и давление P , представлены на рис. 1. Распределение температуры в зоне соединений при КСТ и ИСТ показано на рис. 2. Режим КСТ принято условно называть мягким, а ИСТ — жестким.

При КСТ (рис. 1, а) давление при нагреве составляло $P_{\text{н}} = 50$ МПа, частота вращения n одной из заготовок оставалась постоянной ($n = 20 \text{ с}^{-1}$).

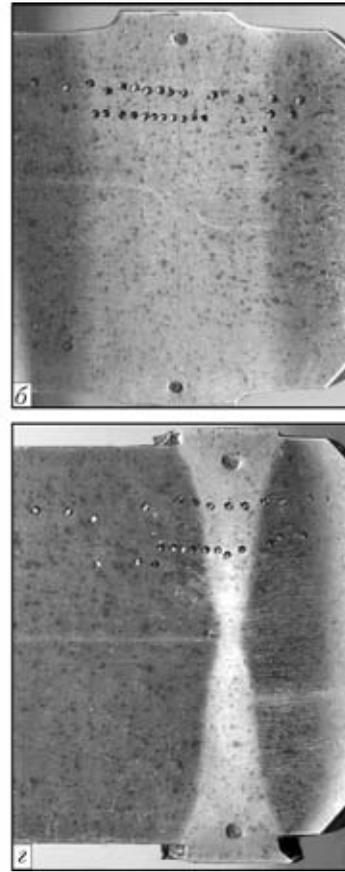
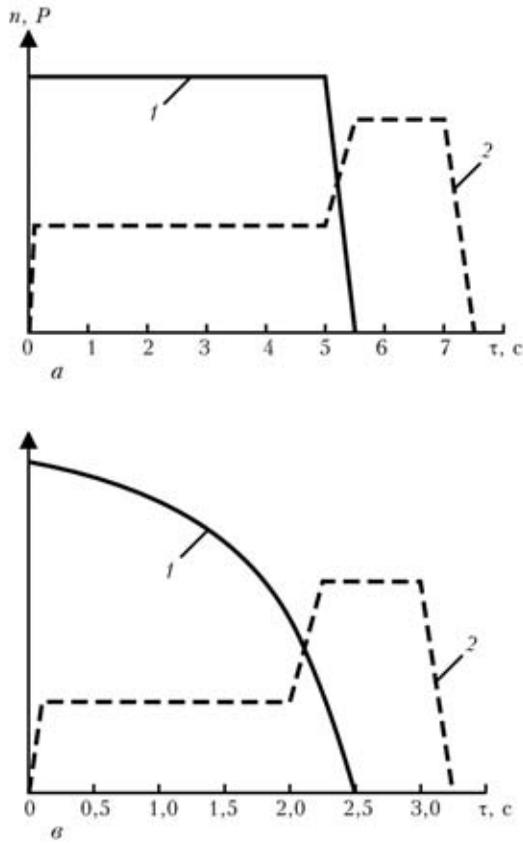


Рис. 1. Циклограммы изменения частоты вращения n (1), давления P (2) и макрошлифы соединений, полученных конвекционной (а, б) и инерционной (в, з) сваркой трением

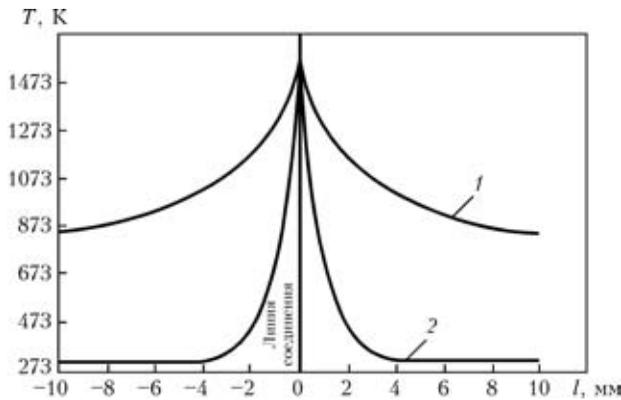


Рис. 2. Распределение температуры в зоне соединения при КСТ (1) и ИСТ (2) [4]; l — расстояние от линии соединения

Усилие проковки $P_{пр} = 100$ МПа прикладывалось после быстрого принудительного торможения вращения. Продолжительность цикла сварки составляла $\tau = 6$ с, осадка (укорочение заготовок при сварке) — 5 мм, максимальная температура в стыке — приблизительно 1593 К, длительность пребывания металла при температуре 1373...1593 К — около 4...5 с. Деформационное воздействие на металл в зоне стыка на этапе формирования соединения характеризуется наличием преимущественно радиальной составляющей. Ширина зоны термического влияния (ЗТВ) при КСТ практически одинакова по всему сечению заготовок, для исследу-

дованных соединений она равна приблизительно 11...12 мм; ширина зоны пластической деформации — около 8 мм.

При ИСТ (рис. 1, в) начальная частота вращения при $P_n = 50$ МПа составляла 40 с^{-1} . Частота вращения снижалась до нуля в процессе торможения вращения за счет сил трения в стыке и при достижении частоты $n = 12,5 \text{ с}^{-1}$ прикладывалось $P_{пр} = 100$ МПа. Продолжительность цикла сварки — 2,5 с, осадка — 5 мм. Длительность пребывания металла при температуре более 1373 К составляла около 2 с. Воздействие на металл стыка на этапе формирования соединения характеризуется наличием радиальной и тангенциальной составляющих деформации. При ИСТ зона пластической деформации имеет характерную X-образную форму, ее ширина в центральной части сечения составляет 1,5...2,0 мм, а в периферийной — около 5 мм. Измерения содержания ПВ в соединениях, полученных ИСТ, проводили на том участке сечения, где ширина зоны пластической деформации составляла 3,5...4,0 мм.

На рис. 3 показано распределение водорода и кислорода в металле в зоне соединения, полученных различными способами СТ. Типичная микроструктура соединения представлена на рис. 4.

В зоне соединений, полученных КСТ (рис. 3, а), по сравнению с основным металлом наблю-



дается снижение содержания водорода примерно в 2 раза на участке шириной около 4 мм. По линии соединения (зона 1 на рис. 4) содержание водорода снижается в 5 раз по сравнению с основным металлом (зона б). Общая ширина зоны изменения содержания водорода соответствует ширине зоны пластической деформации и составляет около 8 мм. Снижение содержания кислорода примерно в 2 раза наблюдается в зоне шириной около 8 мм (рис. 3, б). По линии соединения содержание кислорода снижается примерно в 6 раз. На расстоянии 4 мм симметрично относительно линии соединения наблюдаются пики увеличения содержания кислорода, в 2 раза превышающие его содержание в основном металле. Расположение этих пиков приблизительно соответствует границе зоны пластической деформации. При КСТ ПВ распределяются практически симметрично относительно линии соединения.

В зоне соединений, полученных ИСТ (рис. 3), наиболее заметное снижение содержания водорода наблюдается на участке шириной около 2 мм симметрично относительно линии соединения. Снижение содержания кислорода примерно в 1,5 раза имеет место на участке шириной около 2 мм. Так же, как и при КСТ, наблюдаются пики содержания кислорода, в 2 раза превышающие содержание в основном металле. Они расположены на расстоянии около 2 мм от линии соединения, что соответствует границам зоны пластической деформации. Общая ширина участка изменения водорода и кислорода составляет около 8 мм, что превышает ширину зоны пластической деформации.

Во всех исследованных режимах СТ значения средней частоты вращения n и давления P идентичны, но продолжительность их воздействия на металл, а также закон, по которому n и P изменялись во времени, особенно на конечной стадии сварки, различны.

Установлено, что при обоих способах СТ в зоне стыка наблюдалось снижение содержания водорода и кислорода. Минимальное содержание ПВ фиксировалось по линии соединения, представляющей собой высокотемпературную область (зона 1 на рис. 4). В этой области сосредоточивается взаимодействие свариваемых поверхностей при трении, и ее условно можно рассматривают как «третье тело» [5]. Металл здесь подвергается воздействию температуры приблизительно 1373...1593 К, значительной пластической деформации и характеризуется наличием большого количества дислокаций. В результате полной первичной рекристаллизации в зоне 1 образуется мелкозернистая структура (балл зерна № 10–11). Металл в этой зоне претерпевает полное фазо-

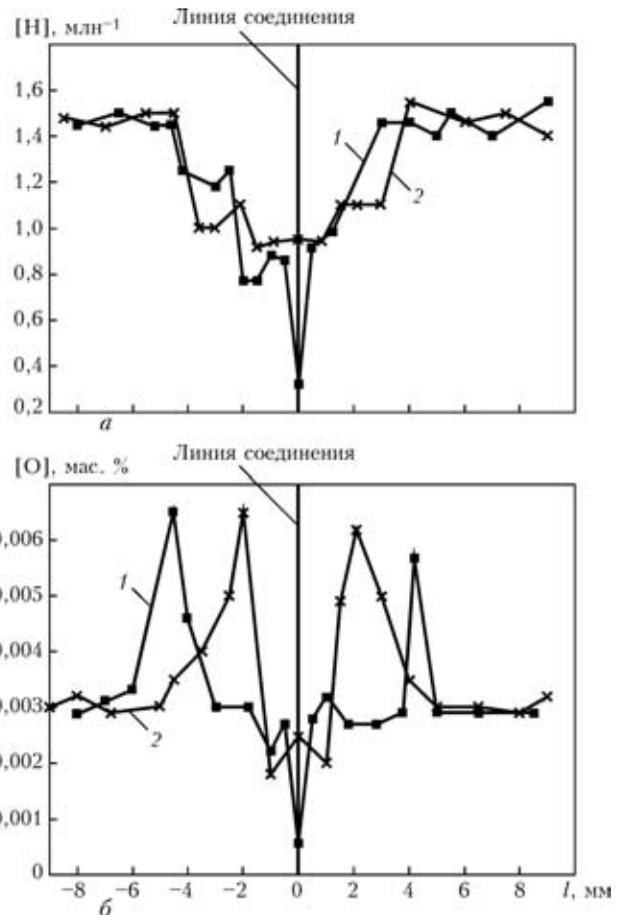


Рис. 3. Распределение водорода (а) и кислорода (б) в зоне соединений стали 10Г2ФБ, полученных способами КСТ (1) и ИСТ (2)

вое превращение (феррит и перлит переходят в аустенит) и при охлаждении превращается в мелкозернистую ферритно-перлитную смесь. Снижение содержания водорода по линии соединения обусловлено, по-видимому, миграцией водорода из зоны соединения (зоны сжатия) с образующимся в процессе сварки гратом, а также его потерей из межзеренных участков при рекристаллизации металла [6] в процессе поворота зерен и формирования новых равноосных зерен.

Снижение содержания кислорода по линии соединения неидентично повышению его содержания в приконтактных объемах металла, которые

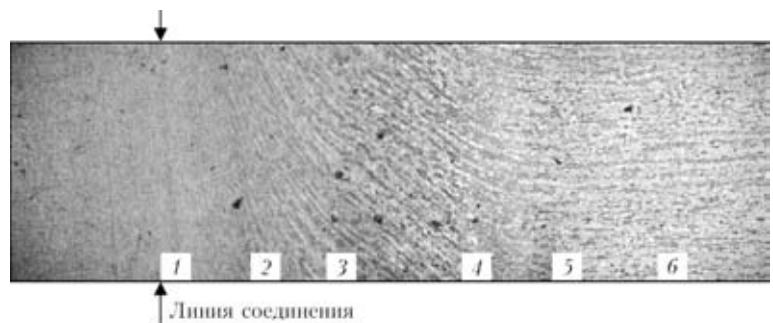


Рис. 4. Микроструктура (X100) соединения стали 10Г2ФБ, полученного ИСТ: 1–6 — см. объяснение в тексте



не подвергались пластической деформации. Такое распределение кислорода можно объяснить влиянием нескольких факторов. Первый — контактное трение и связанные с ним нагрев металла и его деформация в радиальном направлении, которые обеспечивают диспергирование и вытеснение из зоны контакта в грат оксидных фаз и адсорбированных пленок. Второй — процесс разрушения в металле оксидов дислокациями деформирующегося металла. Так, согласно [7–9] пластическая деформация металла в зоне контакта обуславливает поатомное разрушение оксидных фаз дислокациями, переход кислорода в твердый раствор и его частичную миграцию из зоны сжатия. В итоге происходит обогащение кислородом приконтактных объемов металла. Третий фактор — характер распределения температуры в зоне соединения, который определяет положение максимума пика кислорода относительно границы ЗТВ. Совместное влияние перечисленных факторов обуславливает место расположения концентрационных пиков кислорода и их интенсивность.

В зонах 2, 3 (см. рис. 4), непосредственно примыкающих к рекристаллизованной зоне, где температура и степень деформации ниже, имеет место образование как деформированных, вытянутых в радиальном и тангенциальном направлении, так и рекристаллизованных зерен. В этой зоне также фиксируется пониженное содержание ПВ при обоих способах СТ. При удалении от линии соединения рекристаллизованные зерна в деформированных при трении участках отсутствуют, но изменяется характер ориентировки зерен (зона 4). Эта зона плавно переходит в зону упругой деформации (зона 5), представляющей собой часть ЗТВ за пределами зоны пластической деформации, и далее к зоне основного металла (зона 6). Граница изменения содержания водорода при КСТ проходит по зонам 3–4, т. е. приблизительно по зоне пластической деформации. При ИСТ область с пониженным содержанием водорода включает также зону 5.

Ширина зоны изменения содержания водорода при мягком режиме КСТ примерно соответствует ширине зоны пластической деформации. Отличие в содержании водорода при сварке на жестком режиме ИСТ распространяется на большую глубину металла от контактной поверхности по сравнению с шириной зоны пластической деформации. Указанный эффект объясняется тем, что при ИСТ скорость пластической деформации металла в зоне контакта превышает соответствующие показатели при КСТ. Известно [10], что увеличение скорости деформации обуславливает рост скорости массопереноса атомов внедрения.

Восходящая диффузия, при которой возникает направленный дрейф атомов, вызывается локальными градиентами напряжений в кристаллах, ко-

да согласно эффекту Горского атомы внедрения сосредоточиваются преимущественно в зоне растяжения [11]. В работах [6, 7] установлено, что при сжатии стальной трубы металл теряет водород, а при растяжении сорбирует его. На степень потери и поглощения водорода влияет деформация и ее скорость. При импульсной деформации в металле возникает лавина дислокаций, которая захватывает водород и транспортирует его. Глубина перемещения атомов водорода и кислорода определяется не только скоростью деформации, но и размером атома. Перенос атомов внедрения в зоне деформации стабилизируется на расстоянии, обратно пропорциональном размерам атомов [6, 10].

Наибольшее снижение содержания кислорода наблюдается по линии соединения (зона 1 на рис. 4), причем оно наиболее существенное при КСТ. Максимальная температура металла в зоне контакта при нагреве и последующая деформация при проковке после остановки вращения (режим КСТ) приводит к значительному (в 6 раз) снижению содержания кислорода по линии соединения. Расположение пиков содержания кислорода (в 2 раза превышающего его содержание в основном металле) совпадает с границей зоны пластической и упругой деформации (зоны 4, 5 на рис. 4). Очевидно, атомы кислорода в процессе пластической деформации переносятся ядрами дислокаций, скапливающихся на границе зон пластической и упругой деформации [12].

Анализ полученных данных позволяет предположить, что наибольшего развития локальная пластическая деформация достигает в зоне соединения шириной 1,5...2,0 мм (при КСТ) и до 4 мм (при ИСТ). Такой результат является ожидаемым, поскольку при КСТ благодаря быстрой остановке вращения температура поверхностных слоев в момент приложения повышенного усилия проковки $P_{пр}$ максимальна по сравнению с другими способами СТ, металл в плоскости соединения более пластичен и легче деформируется в радиальном направлении.

При приложении повышенного усилия $P_{пр}$ к еще вращающимся заготовкам при ИСТ, т. е. при наличии радиальной и тангенциальной составляющих деформации, зоны пластической и упругой деформации расширяются за счет слоев металла, имеющих более низкую температуру, о чем свидетельствует уровень содержания ПВ на этом участке. Характер изменения содержания водорода и кислорода с удалением от поверхности контакта в сторону основного металла подтверждает наличие значительного влияния тангенциальных деформаций при данном режиме сварки.



Выводы

1. В соединениях стали 10Г2ФБ, полученных СТ, содержание водорода и кислорода в зоне соединения понижено по сравнению с содержанием в основном металле.

2. Перемещение водорода и кислорода из зоны соединения в приконтактные объемы металла стабилизируется на границе зон пластической и упругой деформации.

3. Изменением соотношения радиальной и тангенциальной составляющих деформации при СТ можно регулировать не только температуру металла в зоне соединения, характер и интенсивность деформации, но и локальное содержание и распределение ПВ в сварном соединении.

1. *Распределение азота, кислорода и углерода в зоне соединения металлов, свариваемых взрывом* / О. Д. Смиян, Л. О. Жени-Майская, В. И. Лысак и др. // Автомат. сварка. — 1985. — № 2. — С. 29–33.
2. *Распределение водорода и кислорода в металле шва при ударной конденсаторной приварке шпилек из сплава АМг6* / Е. И. Буткова, О. Д. Смиян, Д. М. Калеко, Н. Я. Резниченко // Там же. — 1988. — № 2. — С. 17–22.
3. *Зяxor И. В.* Современное оборудование для сварки трением // Там же. — 2001. — № 7. — С. 48–52.

4. *Сварка трением: Справочник* / В. К. Лебедев, И. А. Черненко, В. И. Вилль и др. — Л.: Машиностроение, 1987. — 236 с.
5. *Кучук-Яценко С. И., Зяxor И. В.* Механизм формирования биметаллических соединений при сварке трением // Автомат. сварка. — 2002. — № 7. — С. 3–11.
6. *Смиян О. Д.* Перерозподіл домішкових та леговальних елементів під час термічного, деформаційного оброблення та його вплив на зародження й розвиток тріщин в металах: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — К., 2004. — 16 с.
7. *Влияние обработки металла взрывом на содержание и перераспределение водорода* / О. Д. Смиян, Л. О. Жени-Майская, Л. С. Гаврилюк // Сварка взрывом и свойства сварных соединений. — Волгоград: Волгоград. политехн. ин-т, 1986. — С. 128–137.
8. *Смиян О. Д.* Атомний механізм взаємодії речовини середовища з металом, що деформується // Фізика та хімія твердого тіла. — 2002. — № 4. — С. 662–674.
9. *Смиян О. Д., Кружков А. Г.* О некоторых особенностях движения диффузионного потока газов в металлах // Докл. АН СССР. — 1972. — 202, № 6. — С. 1311–1313.
10. *Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних взаимодействий* / Д. С. Герцрикен, В. Ф. Мазанко, В. М. Тышкевич, В. М. Фальченко. — Киев: ИМФ, 1999. — 436 с.
11. *Физика твердого тела: Энциклопед. слов.* В 2 т. / Под ред. В. Г. Барьяхтара. — Киев: Наук. думка, 1996. — Т. 1. — 652 с.
12. *Смиян О. Д.* Механізм формування зародків рівноважних зерен під час рекристалізації конструкційних сталей // Металофізика та новітні технології. — 2004. — № 4. — С. 571–578.

Distribution of interstitial impurities (oxygen and hydrogen) in the joints of 10G2FB steel produced by friction welding has been studied. The procedure and equipment have been applied for local mass-spectral analysis using a laser probe. The nature of distribution of interstitial impurities in the joint zone was established experimentally at different kinds of friction welding, namely conventional and inertia.

Поступила в редакцию 17.01.2007

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Ассоциация сварщиков Грузии и Международный грузино-украинский НИ центр по сварке и родственным технологиям «Интервелд» им. Е. О. Патона предгалают

ЧЕТЫРЕХЯЗЫЧНЫЙ (РУССКО-ГРУЗИНО-АНГЛО-НЕМЕЦКИЙ) ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ ПО СВАРКЕ И РОДСТВЕННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

под редакцией проф. С. Б. Якобашвили

Словарь содержит около 10 000 слов и терминов по сварке и родственным технологиям. Он создан на основе существующих терминологических и политехнических словарей и дополнен современными терминами.

Стоимость словаря 50 дол. США.

Оплата производится в лари Грузии, дол. США или в любой конвертируемой валюте по официальному курсу ЦБ в день оплаты.

Стоимость пересылки с почтовыми расходами составляет:

- для Болгарии, Германии, Венгрии, Румынии, Польши — 25 дол. США
- для Украины — 18 дол. США.

Словарь можно приобрести в офисе «Центра сварки» Грузинского технического университета как за наличный, так и безналичный расчет

Грузинский технический университет «Центр сварки», ул. Костава, 77. 0175. Тбилиси – Грузия

Проф. С. Якобашвили

Тел.: +(995 32) 33-76-44

Тел./факс: +(995 32) 22-75-11