

Заключение

Разработана методика и продемонстрирована возможность легирования титана кремнием с образованием многослойного композитного материала Ti (основа) / Ti_5Si_3 (поверхностный слой), представляющего особый интерес как высокотемпературный легкий материал вследствие формирования высокотемпературного ($T_{пл} = 2400$ К) силицида титана состава Ti_5Si_3 , синтезируемого в едином вакуумном цикле при воздействии высокоинтенсивного электронного пучка субмиллисекундной длительности на систему пленка (кремний) / подложка (титан), сформированную в результате распыления кремния пучком электронов. Выявлены оптимальные режимы облучения системы пленка (Si)/подложка (BT1-0) высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (20 Дж/см², 200 мкс, 3 имп, 0,3 с⁻¹), позволяющие формировать многослойный композитный материал Ti (основа) / Ti_5Si_3 (поверхностный слой с относительным содержанием фазы Ti_5Si_3 57,62 мас. %) с субмикро- нанокристаллической структурой, твердость которого в ~2,5 раза превышает твердость основы. Полученные результаты являются основанием для разработки комбинированной технологии формирования многофазных субмикро- нанокристаллических поверхностных силицидных слоев с особыми физико-механическими свойствами.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы президиума РАН (проект №24).

Литература.

1. High Temperature Structural Silicides // Proc. Of the First High Temperature Structural Silicides Workshop, USA, 1991 - Elsevier Sci. Publ., Amsterdam, 1992. – 278 p.
2. Нечипоренко Е.П., Петриченко А.П., Павленко Ю.Б. Защита металлов от коррозии. – Харьков: Вища школа, 1985. – 112 с.
3. Самсонов Г.В., Эпик А.П. Тугоплавкие покрытия. – М.: Металлургия, 1973. – 400 с.
4. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справ./под ред. Л.С. Ляховича. – М.: Металлургия, 1981. – 420 с.
5. Литовченко С.В., Береснев В.М., Дробышевская А.А., Турбин П.В. Силицидные покрытия на молибдене: получение, структура, свойства // Физическая инженерия поверхности. – 2012. – Т.10, №2. – С. 110-137.

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СОСТАВНОГО ИНСТРУМЕНТА

*В.А. Петрова, к.т.н., доц., А.А. Баканов, к.т.н., доц. *, А.В. Вальтер**, к.т.н., доц.*

Сибирский государственный индустриальный университет

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, e-mail: valyaa.Petrova@mail.ru

**Филиал ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» в г. Новокузнецке*

654000, г. Новокузнецк, ул. Орджоникидзе, 7, e-mail: alekbakanov@yandex.ru

*** Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского Томского политехнического университета*

652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26, e-mail: avwalter@rambler.ru

Методы и средства оценки надежности играют немаловажную роль, поскольку, являясь одной из составляющих качества, она характеризует способность изделий выполнять заданные функции в условиях эксплуатации в течение заданного времени с сохранением определенных свойств. Одним из путей повышения надежности является изучение свойств материала и деформационных процессов, происходящих в нем во время эксплуатации и приводящих к разрушению вследствие появления и развития макротрещин.

Основным технологическим процессом, применяющимся при изготовлении продукции, в том числе инструмента, является сварка, от которой во многом зависит качество и надежность сварного изделия. Несмотря на прогресс в развитии сварочной техники и технологии, в сварных соединениях по ряду причин возникают дефекты различного вида и размеров, приводящие к снижению их работоспособности и долговечности.

С одной стороны, оценка градиентных структурно-фазовых состояний, возникающих при различных воздействиях на материал, позволяет определить пути управления структурными и фазовыми превращениями, например, посредством регулирования параметров сварочного процесса, режи-

мов термической обработки и использованием новых ее технологий с целью получения изделий с заданными эксплуатационными свойствами, не содержащих дефектов.

С другой стороны, контроль качества становится все более самостоятельной технологической операцией. Наряду с методами разрушающего контроля использование неразрушающих методов, контролируемых, как правило, всю продукцию, резко повышает ее эксплуатационную надежность, что особенно важно для изделий, работающих в условиях циклических нагрузок и подверженных усталостному разрушению. Исходя из концепции живучести материала, срок службы которого определяется ростом дефектов до критических размеров, можно достичь большого технико-экономического эффекта, используя методы и средства обнаружения усталостных трещин на ранних стадиях их развития. Особенно широкое практическое применение получил акустико-эмиссионный метод. Это связано с тем, что, во-первых, в данном методе используются физические процессы, сопровождающие развитие усталостной трещины и несущие информацию об источнике (трещине), что может быть зафиксировано специальной аппаратурой. Во-вторых, акустическая эмиссия может успешно применяться для обнаружения и оценки параметров усталостных трещин в объектах сложной геометрической формы. И, в-третьих, возможность дистанционного обнаружения усталостных трещин, так как генерируемые ими волны напряжений распространяются на значительные расстояния.

Проведены испытания на трещиностойкость микрообразцов сварных соединений, полученных стыковой контактной сваркой и предназначенных для составного инструмента, как более экономически выгодного, и свариваемых разнородных сталей (быстрорежущих, углеродистых, легированных), значимость которых при формировании градиентного структурно-фазового состояния наряду с термическим воздействием при сварке существенна. Внешний вид и размеры микрообразцов представлены на рисунке 1.

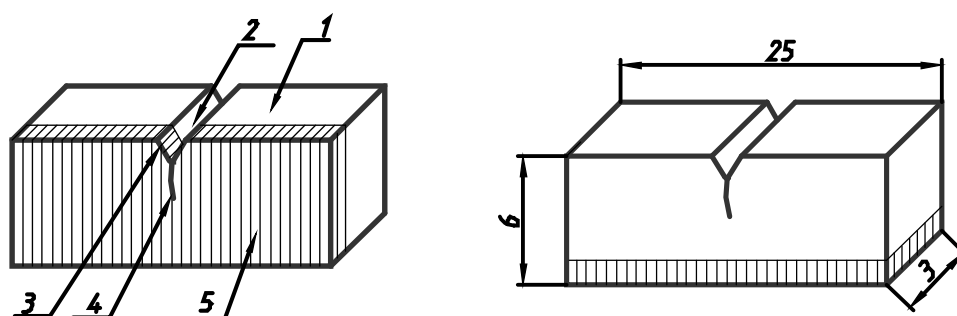


Рис. 1. Микрообразцы для испытания на трещиностойкость
1 - образец; 2 - надрез; 3 - надпил; 4 - трещина; 5 - упрочненный слой

Испытания проводились в два этапа: первый предусматривал зарождение и рост усталостной трещины до реперной линии (рисунок 2), второй – долом образца с трещиной, выращенной до его середины.

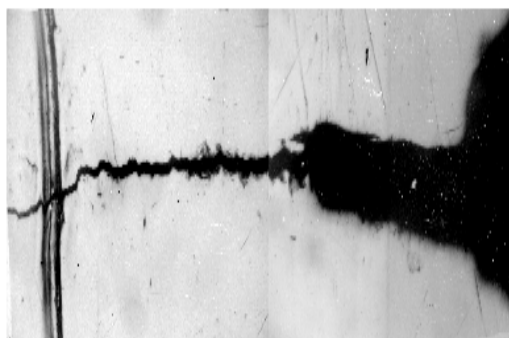


Рис. 2. Усталостная трещина в образце после циклических испытаний, $\times 100$

После испытания внешний вид образца представлен на рисунке 3, а; зоны, полученные после долома, подвергались электронно-микроскопическим исследованиям (рисунок 3, б).

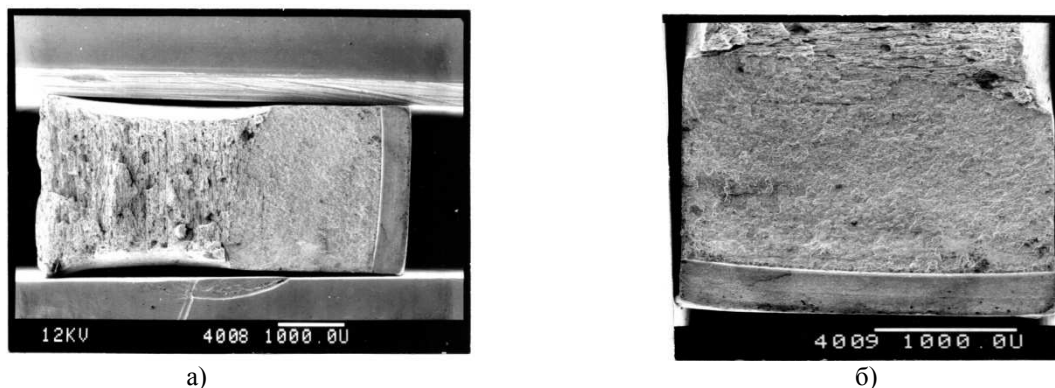


Рис. 3. Образец после долома (а) и зоны долома для исследования на РЭМ (б)
(увеличение приведено под рисунком)

По полученным результатам расчет кинетического (1) и критических (2) параметров трещиностойкости и вывод уравнения Пэриса (3) проводились по программе, включающей также оценку достоверности опытных данных посредством определения доверительного интервала и коэффициента корреляции, изменяющегося в пределах 0,84 – 0,98.

Скорость роста усталостной трещины (dl/dN):

$$dl/dN = \Delta I / (112 \cdot 856 \Delta N), \text{ м/цикл.} \quad (1)$$

Критические коэффициенты интенсивности напряжений K_c ($K_{\max}$):

$$K_c (K_{\max}) = 6 P_Q (P_{\max}) \sqrt{L/10 \cdot \lambda / (t \cdot W)}, \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}, \quad (2)$$

$$\lambda = 1,93 - 3,07 (L/W) + 14,53 (L/W)^2 - 25,11 (L/W)^3 + 25,8 (L/W)^4.$$

Размах коэффициента интенсивности напряжений (ΔK):

$$\Delta K = 6 \Delta P \sqrt{L \cdot \lambda / (t \cdot W)}, \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2},$$

Зависимость Пэриса: $dl/dN = C_0 (\Delta K)^n$, (3)

где P_Q ($P_{\max}$) – расчетная и максимальная нагрузка; t и W – толщина и высота образца; L – длина трещины; C_0 , n – эмпирические постоянные материала.

В условиях плоскодеформированного состояния – наиболее опасного для реализации хрупкого разрушения – вязкость разрушения K_c принимали равным критическому значению K_{Ic} (отрывной вид смещения берегов трещины). Для вязкого материала K_c соответствовало стагнации трещины.

Кинетические диаграммы усталостного разрушения (рисунок 4) и критические коэффициенты интенсивности напряжений (таблица 1) позволяют выбрать сварное соединение и составляющие их стали, обладающие большим сопротивлением распространению трещины.

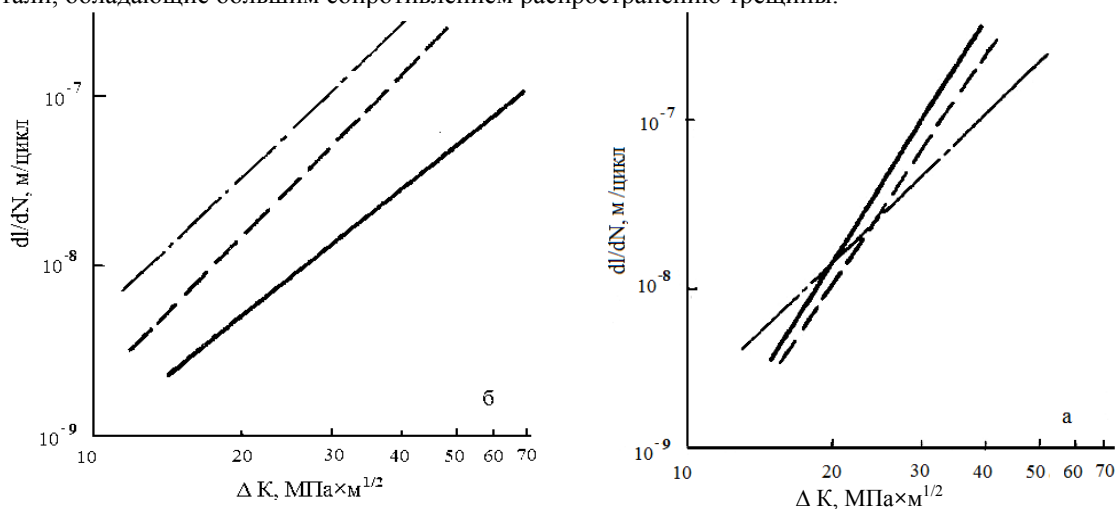


Рис. 4. Кинетические диаграммы усталостного разрушения сварных соединений
сталь Р6М5К5 - сталь У7 (а), сталь Р6М5 - сталь 45 (б)
--- сварное соединение; - · - быстрорежущая сталь; — углеродистая сталь

Таблица 1

Параметр	Критические параметры трещиностойкости			
	Марка стали			
	45	P6M5	У7	P6M5K5
$K_{Ic} / K_{max}, \text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$	47,16* / -	24,58 / 37,14	18,89 / 26,65	19,31 / 26,1

Примечание: * - вязкость разрушения соответствует страгиванию трещины

При оценке влияния на трещиностойкость химического состава составляющих сталей сварного соединения, оказалось, что большим сопротивлением росту трещины обладает сварное соединение со сталью 45, чем со сталью У7. Легирование кобальтом увеличивает трещиностойкость стали P6M5K5, с одной стороны, с другой – нестабильное состояние и хрупкое разрушение реализуются при более низких значениях вязкости разрушения; после азотирования наблюдается значительное уменьшение ее трещиностойчивости.

С целью повышения трещиностойкости использовали поверхностное упрочнение углеродистых сталей посредством высокотемпературного воздействия (лазерное, электронно-лучевое, плазменное).

С помощью лазерной химико-термической обработки (ЛХТО), позволяющей формировать слои с высокой твердостью и износостойкостью, сталь 20 легировали хромом, а затем для повышения объемных прочностных свойств подвергали азотированию. Испытания на трещиностойкость показали преимущество комбинированной технологии упрочнения (таблица 2). При долоте образцов после ЛХТО, азотирования и нормализации не было получено окончательного разрушения в связи с их высокой пластичностью.

Таблица 2

Параметры трещиностойкости сталей 20 после ЛХТО и 20Х		
Термическая обработка	Зависимость Пэриса dI/dN , м/цикл	K_{Ic} , $\text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$
Нормализация	$5,80 \cdot 10^{-12} \cdot \Delta K^{3,32}$	23,17
ЛХТО	$9,75 \cdot 10^{-12} \cdot \Delta K^{3,06}$	29,41
Азотирование	$4,603 \cdot 10^{-12} \cdot \Delta K^{2,69}$	38,15
ЛХТО+азотирование	$3,154 \cdot 10^{-11} \cdot \Delta K^{2,16}$	67,88

Оптимальным режимом лазерного упрочнения стали У10, обеспечивающим высокое значение K_{Ic} и большую трещиностойчивость наряду с высокой твердостью, являлся режим с мощностью излучения $P = 2,0$ кВт и скоростью перемещения образца $V = 4$ мм/с (таблица 3). Как видно, эти результаты и полученные после комбинированной обработки оказались идентичными.

Таблица 3

Вязкость разрушения и твердость стали У10 после ЛО						
P, кВт	K_{Ic} , $\text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$			Твердость, HRC		
	Скорость движения образца, мм/с			Скорость движения образца, мм/с		
	4	10	15	5	10	15
2,0	67,6	42,5	10,1	36,7	32,6	11,9
2,5	63	64	57	63	63	60

Исследование покрытий двух систем Fe-Cr-Mn-V-C-B-Si ($K_{Ic}=32,9 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$) и Ni-Ti ($K_{Ic}=27,5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$), напыленных на поверхность стали 20Х13 и оплавленных электронным лучом, выявило преимущество первого в отношении параметров трещиностойкости, особенно при циклическом нагружении.

Следовательно, по такой характеристике, как трещиностойкость, можно судить о работоспособности материала.

На фрактограммах, полученных при изломе образцов, подвергнутых знакопеременным циклическим и статическим нагрузкам, можно выделить три зоны (рисунок 5): усталостное разрушение с характерными усталостными бороздками (а), вытяжки или перехода (б, д) и долома (в, г, е). В сварном соединении трещина может распространяться по любым из вышеуказанных участков, поэтому при доломе реализуется ямочное разрушение (в), или сколом (г), или по перлитным колониям (в, г).

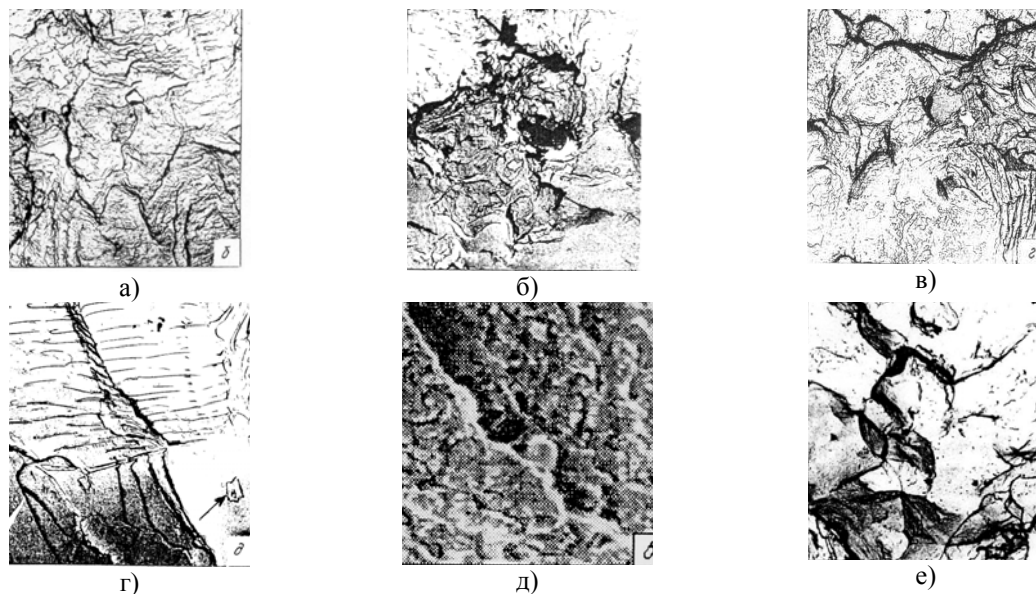


Рис. 5. Фрактограммы сварных соединений
сталь Р6М5 - сталь У7 (а – г), $\times 5400$ и сталь Р6М5К5 - сталь У7 (д), $\times 600$;
поверхностно упрочненной стали У10 (е), $\times 3000$

Присутствие карбидов (показано стрелкой) указывает на разрушение по быстрорежущей стали. При разрушении, происходящем по сварному шву, в соединении сталь Р6М5К5 - сталь У7 выявлена трещина, образовавшаяся, вероятно, в результате расслоения металла вследствие большого нагружения. Таким образом, фрактографические исследования позволяют проследить путь трещины и обнаружить дефекты в материале.

Разрушение стали 20 после комбинированной и стали У10 после лазерной обработки имеет свои особенности. Так, в зоне усталостной трещины упрочненной поверхности стали 20 наблюдается хрупкое разрушение сколом, проявляющееся в виде фасеток скола с характерным ручьистым узором. При распространении трещины в упрочненной слое стали У10 как в начальной стадии, так и при доломе происходит межзеренное разрушение, которое имеет "камневидный" характер (рисунок 5, е). Разрушение стали 20Х13 после электронно-лучевого оплавления и покрытий происходит по смешанному механизму – квазискол, скол, слияние микропор, причем долом покрытия Fe-Cr-Mn-V-C-B-Si является вязким, а долом покрытия Ni-Ti – хрупким (внутризеренный скол).

Все вышеприведенные данные получены в результате использования разрушающих методов контроля, которые, как правило, применяются для контроля качества конечного продукта. Наиболее перспективным является применение неразрушающих методов в начале изготовления изделий (в данном случае сварного инструмента), поскольку имеется возможность исключить дальнейшие этапы обработки вследствие обнаружения бракованных заготовок на начальной стадии производства. К таким методам относится регистрация сигналов акустической эмиссии (АЭ) при проведении любых экспериментов, связанных с изменением напряженно-деформированного состояния.

В нашем случае для отработки методики регистрации АЭ, испытывались заготовки стыковых сварных соединений при статическом нагружении трехточечным изгибом (рихтовке). В качестве образцов использовались заготовки для инструмента, полученные стыковой контактной сваркой быстрорежущей Р6М5 с углеродистой сталью У7. При этом часть образцов не имела дефектов по сварке – другая с задаваемыми дефектами. Анализ полученных зависимостей показал, что суммарная акустическая эмиссии N_{Σ} и активность сигналов АЭ образца с дефектом значительно превышали эти пара-

метры при испытаниях бездефектных образцов, поскольку последние при нагрузках менее $0,7\sigma_b$ не разрушались и характерным для них являлось монотонное изменение нагрузки во времени.

Для проведения лабораторных исследований с регистрацией сигналов акустической эмиссии использовались широкополосный прибор с полосой пропускания 0,1 – 1,5 МГц и прибор с переменной полосой пропускания в двух диапазонах 0,1 – 0,6 и 0,6 – 1,2 МГц, при этом ее ширина составляла 8 кГц. Для этих приборов разработаны широкополосные и резонансные (для повышения чувствительности и уменьшения низкочастотных механических и производственных шумов) преобразователи.

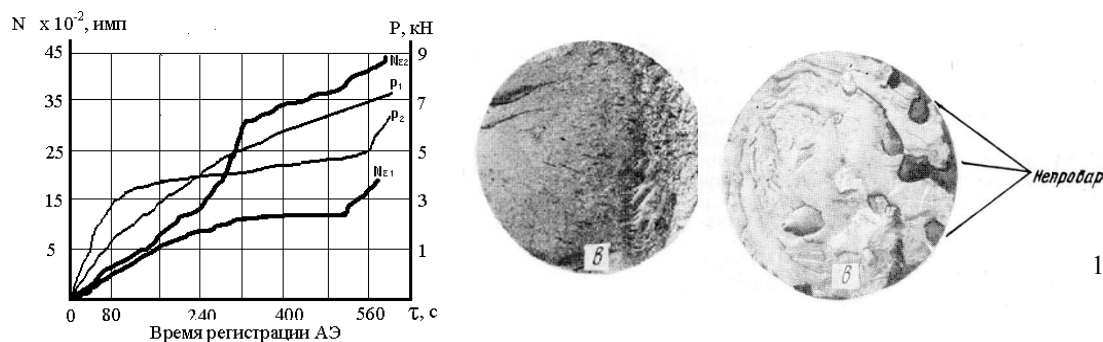


Рис. 6. Суммарная акустическая эмиссия и фрактограммы изломов бездефектного (1, $N_{\Sigma 1}$) и дефектного (2, $N_{\Sigma 2}$) образцов

Для оценки влияния суммарной площади дефектов в сварном шве (площадь дефектов согласно ТУ не должна превышать 2%) проведены испытания заготовок диаметром 25 мм на трехточечный изгиб с регистрацией сигналов акустической эмиссии. Эксперименты проводились при нагрузках, меньших предварительно установленной нагрузки разрушения, а при доломе определялась относительная площадь дефектов. Поскольку при нагружении изделий с бездефектными сварными швами также регистрируются сигналы акустической эмиссии, была проведена оценка их количества с применением метода математического планирования. Исходя из выбранных факторов: диаметра заготовки d и исходного нагружения P получено уравнение

$$N_{\Sigma} = 1072,3 - 221,4d - 1,81P + 0,519dP.$$

Таким образом, предложенная методика неразрушающего контроля позволяет использовать полученные результаты для обоснования применения регистрации сигналов акустической эмиссии в качестве экспресс-метода для определения дефектности стыковых соединений при рихтовке заготовок.

Кроме того, получены результаты по контролю качества стыковых сварных соединений в процессе производства на станках-полуавтоматах, что дает существенную экономию вследствие исключения дальнейшей механической и термической обработок бракованной продукции. При анализе процесса изготовления составного инструмента выявлены следующие временные стадии сварки: работа зажимов, разогрев заготовки, сварка и выдавливание грата, остывание шва, работа зажимов. Перед разработкой системы контроля на основе регистрации сигналов АЭ были сняты амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) акустических сигналов всего процесса сварки с использованием установки «Спектр» (СА-100), которая позволяла получать информацию по 100 частотным каналам с выводом на матричный экран в виде гистограмм.

Система контроля состоит из блока управления сварочным аппаратом, где задаются параметры сварки (диаметр заготовки, усилие поджима, время разогрева и охлаждения заготовки); непосредственно заготовки; подвижного охлаждаемого зажима, к которому приваривается волновод; преобразователя сигналов акустической эмиссии, закрепляемого на волноводе через слой контактной жидкости; регистратора сигналов АЭ, функционально связанного с блоком управления сварочного агрегата.

Электрическая часть работы сварочного аппарата полуавтоматизирована. Регистратор АЭ, информационное табло которого находится в непосредственной близости от оператора, имеет индикацию «годен - не годен». Задачей оператора является включение прибора и установка диаметра свариваемой заготовки переключателем. Таким образом, при переходе от одного диаметра к другому или при смене марок сталей регистратор позволяет корректировать режимы сварки с целью предотвращения брака.