



# Обработка металлов

## (технология • оборудование • инструменты)

 Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)


### Исследование рассеяния энергии и жесткости сварных соединений стыковой сварки давлением

Анатолий Майтаков<sup>a, \*</sup>, Алексей Грачев<sup>b</sup>, Анатолий Попов<sup>c</sup>, Сергей Ли<sup>d</sup>,  
 Надежда Ветрова<sup>e</sup>, Константин Плотников<sup>f</sup>

Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0714-204X>, [may585417@mail.ru](mailto:may585417@mail.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0008-3997-5282>, [kafedra.mats@yandex.ru](mailto:kafedra.mats@yandex.ru),  
<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0728-7211>, [popov4116@yandex.ru](mailto:popov4116@yandex.ru), <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7174-2501>, [li@kemsu.ru](mailto:li@kemsu.ru),  
<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7131-0511>, [veteroknadi@mail.ru](mailto:veteroknadi@mail.ru), <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4145-0027>, [k.b.plotnikov@mail.ru](mailto:k.b.plotnikov@mail.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 691.175: 62-977

#### История статьи:

Поступила: 07 апреля 2023  
 Рецензирование: 15 апреля 2023  
 Принята к печати: 17 мая 2023  
 Доступно онлайн: 15 сентября 2023

#### Ключевые слова:

Сварной шов  
 Стыковая сварка  
 Непровар  
 Гистерезис  
 Рассеяние энергии

#### Благодарности

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнауки № 13.ЦКП.21.0034).

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** При исследовании рассеяния энергии, связанной с внутренним трением в сварном шве, чрезвычайно важным является выбор методики измерения, так как от этого зависит надежность и достоверность получаемых данных. При этом необходимо исследовать изменение внутреннего трения в зависимости от наличия дефектов в сварном шве. Из неразрушающих методов для контроля соединений, полученных сваркой давлением, в настоящее время применяется только ультразвуковой контроль. Однако при этом не выявляются слабо окисленные непровары, которые удается обнаружить только при наличии сопровождающих их других дефектов. Соединения разноименных материалов ультразвуком не контролируются, поэтому разработка неразрушающих методов контроля таких соединений является весьма актуальной. **Цель работы:** создание процедуры тестирования качества сварного соединения в металлах и сплавах, которая будет быстрой и простой альтернативой известным методам неразрушающего контроля, за счет измерения рассеяния энергии в сварном шве образца методом статической петли гистерезиса. **В работе исследованы образцы,** полученные на машине сварки трением и на машине стыковой контактной сварки. Исследования осуществлялись на соединениях однородных сталей *сталь 45 + сталь 45* и разнородных *сталь 45 + сталь Р6М5*. **Метод исследования:** неразрушающий контроль качества сварного соединения в металлах и сплавах за счет измерения рассеяния энергии в сварном шве образца методом статической петли гистерезиса. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что с увеличением непровара в сварном шве рассеяние энергии возрастает при одинаковых значениях амплитуды крутящего момента в условиях статического нагружения. Жесткость качественно сваренных соединений остается постоянной, а жесткость соединений с непроваром уменьшается с увеличением амплитуды крутящего момента. Связь прочности с жесткостью и демпфирующей способностью, полученная методом статической петли гистерезиса, сохраняется для различных структурных состояний материала образцов.

**Для цитирования:** Исследование рассеяния энергии и жесткости сварных соединений стыковой сварки давлением / А.Л. Майтаков, А.В. Грачев, А.М. Попов, С.Р. Ли, Н.Т. Ветрова, К.Б. Плотников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 104–116. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-104-116.

## Введение

При рассеянии энергии, связанной с внутренним трением, чрезвычайно важным является выбор методики измерения, так как от этого часто зависит надежность и достоверность экспериментальных данных. Измерения в металлах

и сплавах выполняются с двумя целями. С одной стороны, стремятся определить абсолютные значения внутреннего трения, а с другой – проводят измерения для получения величин, связанных с изменением состояния твердого тела или с различием между разными его состояниями. В настоящей работе исследуется изменение внутреннего трения в сварных образцах в зависимости от наличия дефектов в сварном шве, поэтому первостепенный интерес представляет измерение не только абсолютных величин внутреннего трения, но и их изменений, причем чувствитель-

#### \*Адрес для переписки

Майтаков Анатолий Леонидович, д.т.н., профессор  
 Кемеровский государственный университет,  
 ул. Красная, 6,  
 650000, г. Кемерово, Россия  
 Тел.: +7 (3842) 39-68-40, e-mail: [may585417@mail.ru](mailto:may585417@mail.ru)

ность аппаратуры к таким изменениям должна быть достаточной высокой. При этом особое внимание должно быть обращено на снижение трудоемкости измерений.

Энергетический метод может быть применен для исследования рассеяния энергии в таких материалах, для которых соответствующим подбором химического состава и термической обработки можно получить образцы, обладающие практически одинаковыми удельным весом и упругими свойствами, но имеющие большую разницу в способности рассеяния энергии при колебаниях. Этот метод требует регистрации амплитуды установившихся колебаний образца, что в условиях производства представляет значительные трудности [1]. Относительное рассеяние энергии в материале исследуемого образца при его колебаниях определяется расчетом по данным измерений на специальной установке.

Применение метода динамической петли гистерезиса нецелесообразно из-за низкой чувствительности аппаратуры для измерения динамических деформаций.

Метод кривой резонанса используют при малых уровнях деформаций, когда необратимые потери невелики и колебательную систему можно считать практически линейной [2–5]. В работе [6] рассмотрено применение этого метода при любой нелинейности амплитудной зависимости рассеяния энергии. При высокой добротности системы чувствительность метода к изменению внутреннего трения является очень низкой, что не позволяет применять этот метод для выявления дефектов сварного соединения.

Использовать зависимость резонансной частоты системы от уровня необратимых потерь энергии в материале упругого элемента в данном случае также нельзя, поскольку на изменение резонансной частоты большее влияние будут оказывать отклонения в размерах образцов, чем наличие дефекта в сварном шве.

Из неразрушающих методов для контроля стыковых соединений, полученных сваркой давлением, в настоящее время применяется только ультразвуковой контроль. При этом на результаты контроля большое влияние оказывает неоднородность внутренней структуры, не выявляются слабо окисленные непровары, которые удается обнаружить только при наличии сопровождающих их других дефектов [5]. Соединения

разноименных материалов вообще ультразвуком не контролируются [16], поэтому разработка неразрушающих методов контроля таких соединений является весьма актуальной.

В настоящей работе внутреннее трение определяется методом статической петли гистерезиса образца. Применение метода статической петли гистерезиса обусловлено тем, что он позволяет определить рассеяние энергии практически непосредственно в сварном шве. С целью получения положительных результатов могут быть использованы чувствительные устройства [7, 8] для регистрации малых перемещений. Измерение рассеяния энергии методом статической петли гистерезиса в этом случае осуществляется при нагружении сварного соединения знакопеременным крутящим моментом.

Работоспособность соединений зависит от их прочности, жесткости и демпфирующей способности, а присутствие непроваров в сварном соединении увеличивает рассеяние энергии и уменьшает прочность. Несмотря на широкое применение стыковой сварки давлением, до сих пор не существует надежных способов выявления основного дефекта этих соединений – слабо окисленного непровара.

**Цель исследования** состоит в том, чтобы создать процедуру тестирования качества сварного соединения в металлах и сплавах, которая будет быстрой и простой альтернативой известным методам неразрушающего контроля, за счет измерения рассеяния энергии в сварном шве образца методом статической петли гистерезиса.

## Методика исследований

Для проведения исследований были изготовлены образцы на машине МФ-327 сваркой трением и на машине МСР-30 стыковой контактной сваркой. Сварка трением и стыковая контактная сварка были выбраны как наиболее широко применяемые в промышленности, а также потому, что особенности соединений, выполненных стыковой сваркой давлением, наиболее полно объединены в соединениях, полученных этими видами сварки [9–10]. Исследования осуществлялись на соединениях однородных сталей *сталь 45 + сталь 45* и разнородных *сталь 45 + сталь Р6М5*. Выбор материалов образцов обусловлен широким их применением в промыш-

ленности. Режимы сварки заготовок диаметром 25 мм приведены в табл. 1 для соединений *сталь 45 + сталь 45* и *сталь 45 + сталь Р6М5*, полученных контактной сваркой. Для композиции *сталь 45 + сталь 45* время нагрева варьировалось в пределах 15 с, в то время как продолжительность нагрева разнородных образцов *сталь 45 + сталь Р6М5* возростала до 25 с.

В табл. 2 показаны режимы для соединений *сталь 45 + Р6М5* и *сталь 45 + сталь 45*, полученных трением.

После сварки все заготовки, а также заготовки из цельного прутка стали 45 и стали Р6М5 подвергались отжигу при 850 °С в течение 10 ч. Для обеспечения однородности размеров по

диаметру образцы протачивались на токарном станке. Диаметр образцов в месте сварки составил 17,2 + 0,05 мм, а их длина – 170 мм. Лапки образцов сострагивались без последующей механической обработки.

Как уже упоминалось во введении, внутреннее трение определялось методом статической петли гистерезиса, что позволило измерить рассеяние энергии практически непосредственно в сварном шве [1, 3–15]. Исследования выполнялись на испытательной машине КМ-50-1, предназначенной для испытания образцов из металлов на кручение. Измерение рассеяния энергии методом статической петли гистерезиса осуществлялось при нагружении сварного соеди-

Таблица 1

Table 1

**Режимы контактной сварки заготовок для соединений *сталь 45 + сталь 45*  
и *сталь 45 + сталь Р6М5***

**Modes of resistance welding of blank pairs *steel 45 + steel 45* and *steel 45 + steel R6M5***

| № режима | Суммарная осадка, мм | Вторичное напряжение, В | Время нагрева, с |
|----------|----------------------|-------------------------|------------------|
| 1        | 2                    | 3,5                     | 15...25          |
| 2        | 3                    | 3,5                     | 15...25          |
| 3        | 4                    | 3,5                     | 15...25          |
| 4        | 5                    | 3,5                     | 15...25          |
| 5        | 6                    | 3,5                     | 15...25          |
| 6        | 10                   | 3,5                     | 15...25          |

Таблица 2

Table 2

**Режимы сварки трением для соединений *сталь 45 + Р6М5* и *сталь 45 + сталь 45***

**Modes of friction welding of blank pairs *steel 45 + steel R6M5* and *steel 45 + steel 45***

| № режима | Частота вращения, об/мин | Удельное давление нагрева, Н/мм <sup>2</sup> | Удельное давление проковки, Н/мм <sup>2</sup> | Время нагрева, с |
|----------|--------------------------|--|---|------------------|
| 1        | 1500                     | 156  | 236   | 2                |
| 2        | 1500                     | 156  | 236   | 8                |
| 3        | 1500                     | 156  | 236   | 9                |
| 4        | 1500                     | 156  | 236   | 12               |
| 5        | 1500                     | 156  | 236   | 15               |
| 6        | 1500                     | 156  | 236   | 25               |
| 7        | 1500                     | 156  | 236   | 30               |
| 8        | 1500                     | 27   | 27  | 3                |
| 9        | 1500                     | 27   | 27  | 5                |
| 10       | 1500                     | 60   | 60  | 5                |
| 11       | 1500                     | 60   | 60  | 10               |
| 12       | 1500                     | 100  | 100   | 6                |
| 13       | 1500                     | 160  | 160   | 5                |
| 14       | 1500                     | 170  | 170   | 10               |

нения знакопеременным крутящим моментом, а перемещения фиксировались лазерным датчиком с цифровой индексацией LАН-G и разрешением 0,5 мкм.

Снятие показаний индикатора производилось после нескольких циклов предварительного нагружения, что соответствовало замыканию петли гистерезиса. После снятия петли при одной амплитуде знакопеременного крутящего момента цикл нагружения производился уже при большей амплитуде момента, для которой также строилась петля гистерезиса и т. д. Нагружение сварного соединения крутящим моментом производилось только в упругой области деформирования всего образца. Диссипация энергии в зоне сварки при приложении знакопеременного момента больше статического предварительного смещения похожа по своему характеру на пластическую деформацию [6]. Микротрение приводит к поглощению энергии контактом – гистерезису. Гистерезисные потери в сварном соединении определялись площадью петли (рис. 1).

В качестве меры внутреннего трения могут быть выбраны различные величины независимо от источников энергетических потерь. Наиболее часто используется коэффициент поглощения  $\psi = \Delta W / W$ , где  $\Delta W$  – необратимо рассеянная энергия за один цикл нагружения в следующих координатах: крутящий момент  $T_{кр}$  и соответствующее перемещение  $\varphi$ . Амплитудное значение потенциальной энергии характеризуется площадью треугольника  $OAB$  (рис. 1).

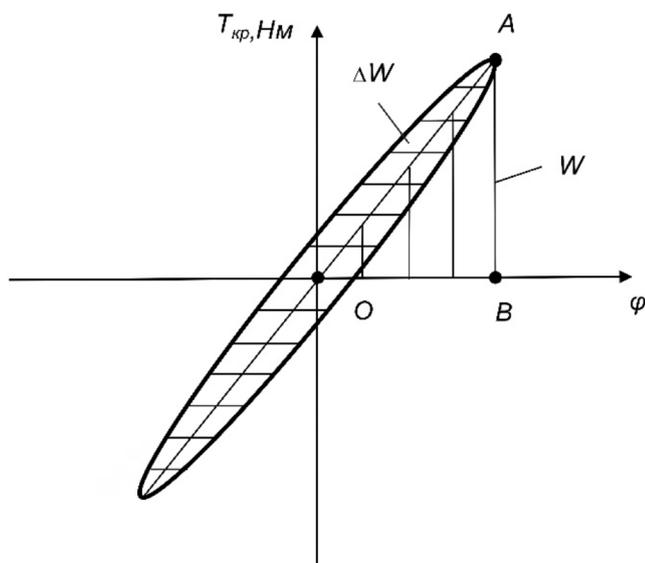


Рис. 1. Гистерезисные потери в сварном соединении  
Fig. 1. Hysteresis losses in a welded joint

Рассеяние энергии, определяемое методом статической петли гистерезиса, представляет собой сумму потерь для соединений *сталь 45 + сталь 45* и описывается зависимостью  $W = 2W_1 + W_3$ , а для образцов *сталь 45 + сталь Р6М5* – зависимостью  $W = 2W_1 + W_2 + W_3$ . В этих зависимостях  $W_1$  и  $W_2$  характеризуют рассеяние энергии в объеме основного металла стали 45 и Р6М5 соответственно, заключенном между сварным швом и ножом датчика, а  $W_3$  – рассеяние энергии в сварном шве [4, 6, 12].

Отсюда следует, что для получения рассеяния энергии  $W$  в сварном шве необходимо из общего рассеяния энергии вычесть рассеяние энергии в основном материале.

Коэффициент поглощения сварного шва определяется также вычитанием из общего коэффициента поглощения потерь в основном материале.

Жесткость  $C$  представляется в настоящей работе как жесткость части образца, заключенной между ножами датчиков.

## Результаты и их обсуждение

Проводилось изучение влияния базы измерения  $l$  на рассматриваемые параметры на отожженных образцах. Рассеяние энергии в материале образцов при знакопеременном нагружении крутящим моментом возрастает прямо пропорционально расстоянию между ножами датчиков при его увеличении от 2 до 6 мм (рис. 2). Линии 1, 2, 4 характеризуют рассеяние энергии в стали Р6М5 при амплитудных значениях крутящего

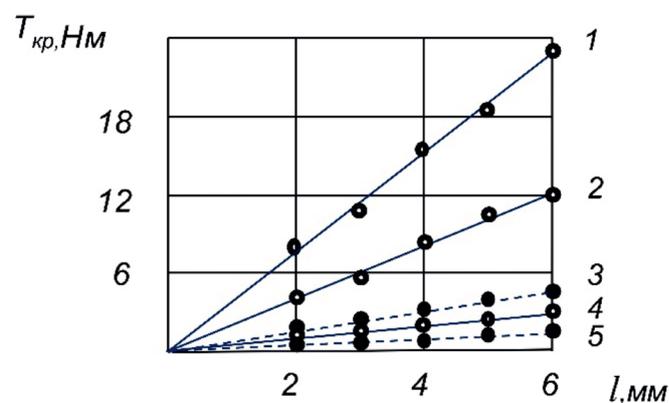


Рис. 2. Влияние базы измерения  $l$  на рассеяние энергии при различных значениях крутящего момента  
Fig. 2. Dependence of energy dissipation on the gauge length  $l$  at various torque values

момента  $T_{кр}$ , равных 196, 176,4 и 137,2 Нм. Линии 3, 5 обозначают рассеяние энергии в стали 45 при амплитудных значениях крутящего момента 196 и 176,4 Нм. Увеличение рассеяния энергии обусловлено возрастанием объема материала образца, в котором производится измерение. Возрастание объема происходит за счет увеличения длины при постоянстве диаметра.

Коэффициент поглощения, являющийся относительной характеристикой, с увеличением базы измерения остается постоянным как для стали 45 ( $\varphi = 0,05$ ), так и для стали Р6М5 ( $\varphi = 0,6$ ). Измерения проводились при амплитуде крутящего момента 176,4 Нм. Измеряемое значение жесткости уменьшается с увеличением расстояния между сечениями установки ножей датчиков (рис. 3). Зависимости получены для стали 45 (линия 1) и стали Р6М5 (линия 2) при амплитуде крутящего момента 176,4 Нм.

$C \cdot 10^5, \text{ Нм/рад}$

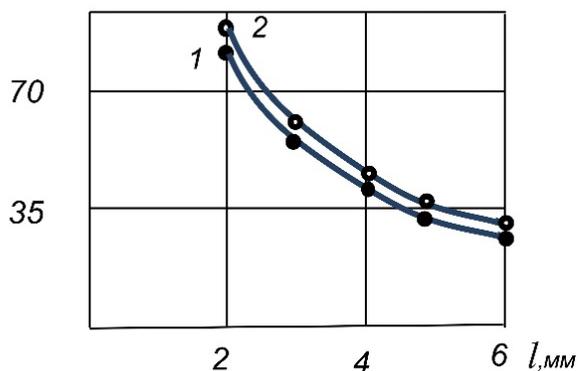


Рис. 3. Зависимость показаний измерения жесткости от базы измерения  $l$

Fig. 3. Dependence of stiffness on the gauge length  $l$

Уменьшение жесткости связано с тем, что с увеличением расстояния между сечениями установки ножей датчиков при постоянном крутящем моменте  $T_{кр}$  угол поворота сечений  $\varphi$  (рис. 1) относительно друг друга увеличивается. При значительном увеличении базы измерения эта зависимость становится все более выпуклой.

При изменении значения крутящего момента рассеяние энергии в сварных швах также изменяется. На рис. 4 и 5 приведены амплитудные зависимости рассеяния энергии в сварных швах соединений *сталь 45 + сталь 45* и *сталь 45 + Р6М5* соответственно, а также в цельных образ-

$\omega \cdot 10^{-3}, \text{ Нм} \cdot \text{рад}$

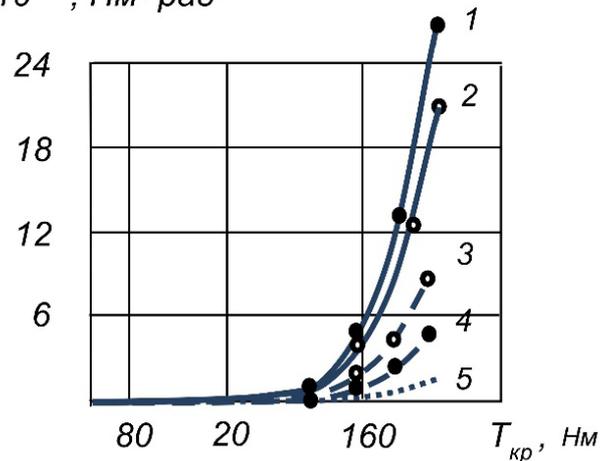


Рис. 4. Амплитудная зависимость рассеяния энергии в сварных швах соединений *сталь 45 + сталь 45*

Fig. 4. Amplitude dependence of energy dissipation in welded joints of *steel 45 + steel 45*

$\omega \cdot 10^{-3}, \text{ Нм} \cdot \text{рад}$

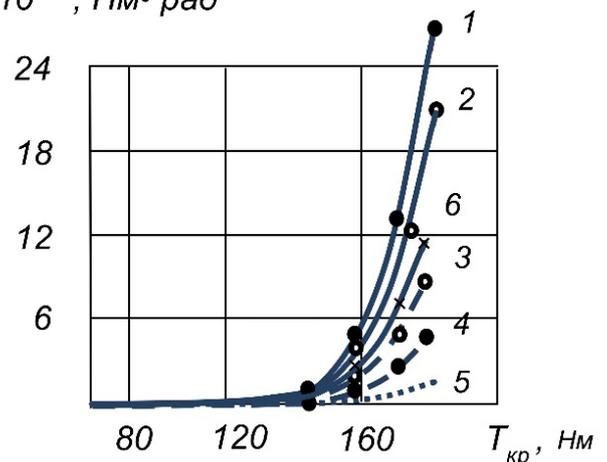


Рис. 5. Амплитудная зависимость рассеяния энергии в сварных швах соединений *сталь 45 + Р6М5*

Fig. 5. Amplitude dependence of energy dissipation in welded joints of *steel 45 + steel R6M5*

цах из этих сталей. Обозначения на рисунках: 2, 3 – соединения, полученные сваркой трением; 1, 4 – полученные контактной сваркой; 5, 6 – цельные образцы соответственно из стали 45 и стали Р6М5.

Показанное на рис. 4 и 5 рассеяние энергии в стали 45 и стали Р6М5 при знакопеременном нагружении образцов в упругой области происходит за счет локальной микропластической деформации отдельных перенапряженных участков зерен. Перенапряжения участков зерен возникают вследствие анизотропии модуля упругости [4, 17]. Межзёренным смещениям

принадлежит второстепенная роль, поскольку основным механизмом пластической деформации являются внутризёрненные сдвиги [17].

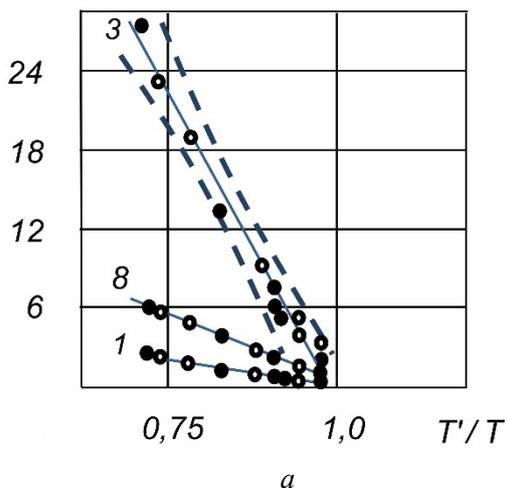
В сварных швах подавляющая часть рассеиваемой энергии приходится на непровар, который согласно [7, 18] можно представить как плотностный механический контакт. Во время знакопеременных нагружений контакта тангенциальной силой в нем происходит предварительное смещение во взаимно противоположных направлениях [16]. При этом осуществляются пластическая и упругая деформации сдвига микровыступов шероховатой поверхности. В процессе пластической деформации при микросмещении, когда оно происходит первично, материал, упрочняясь, повышает свой предел упругости. Повторное смещение после разгрузки совершается в пределах упругости, но с участием микротрения, поэтому деформация и принимает упругофрикционный характер, сходный с характером пластической деформации. Помимо деформации элементов контакта имеет место их скольжение. В это скольжение они вступают не все сразу, а последовательно один за другим. Это обусловлено тем, что микровыступы увлекаются в сдвиг микротрением на площадках касания элементов, сжатых по-разному. Кроме того, жесткость микровыступов различна.

По аналогии со сдвиговой прочностью контакта сварные швы с различной вели-

чиной непровара рассеивают энергию по-разному. Чем больше непровар, тем больше энергии рассеивается в сварном шве. Это объясняется, во-первых, тем, что в большем по площади контакте деформируется большее количество микровыступов и большее количество элементов контакта проскальзывает. Во-вторых, непровар уменьшает полярный момент сопротивления сечения, а это приводит к возникновению больших касательных напряжений в тех сварных швах, которые имеют больший непровар, при нагружении всех соединений равным крутящим моментом. Большое касательное напряжение вызывает большее микросмещение, что приводит к увеличению рассеяния энергии в сварном шве. С увеличением амплитуды нагружения растет и разница в энергии, рассеянной в швах с различной величиной непровара.

Связь рассеяния энергии с относительной прочностью соединений для различных амплитуд крутящего момента оказалась удовлетворительной (рис. 6). Линии 1, 2, 3 соответствуют амплитудам 147, 156,8 и 176,4 Нм; «○» – соединения, полученные сваркой трением; «●» – полученные контактной сваркой. По оси абсцисс отложено отношение разрушающего момента образца к разрушающему моменту образца из отожженной стали 45. Такое обозначение принято на всех рисунках.

$\omega \cdot 10^{-3}$ , Нм·рад



$\omega \cdot 10^{-3}$ , Нм·рад

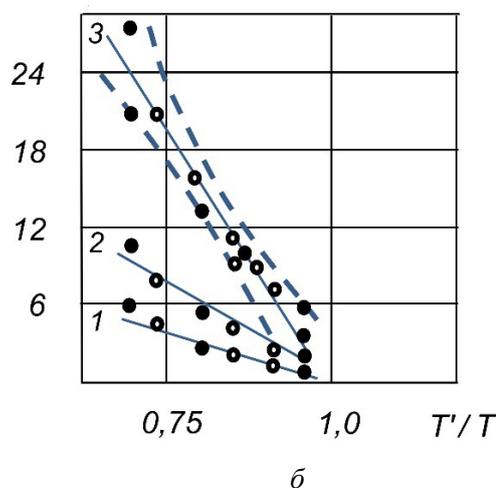


Рис. 6. Связь рассеяния энергии с относительной прочностью соединения:  
а – сталь 45 + сталь 45; б – сталь 45 + Р6М5 для различных амплитудных значений крутящего момента

Fig. 6. Relation between energy dissipation and relative strength of welded joints:  
а – steel 45 + steel 45; б – steel 45 + R6M5 for different torque amplitudes

Зависимость коэффициента поглощения от амплитуды нагружения (рис. 7) аналогична зависимости рассеяния энергии. Линии 2, 3 обозначают соединения, полученные сваркой трением; 1, 4 – полученные контактной сваркой; линии 5 обозначают сплошные образцы из стали 45 (рис. 7, а) и стали Р6М5 (рис. 7, б). Связь относительной прочности соединений с коэффициентом поглощения сварных швов представлена на рис. 8. Обозначения аналогичны рис. 6.

С увеличением амплитуды нагружения жесткость образцов из стали 45 и Р6М5, а также сварных образцов, не имеющих непровара, остается постоянной (рис. 9). Линия 2 обозначает соединения, полученные сваркой трением; 1, 3 – полученные контактной сваркой; 4, 5 – сплошные образцы из стали 45 и Р6М5.

Постоянство жесткости объясняется прямой пропорциональной зависимостью деформации от нагрузки при нагружении образца в упругой

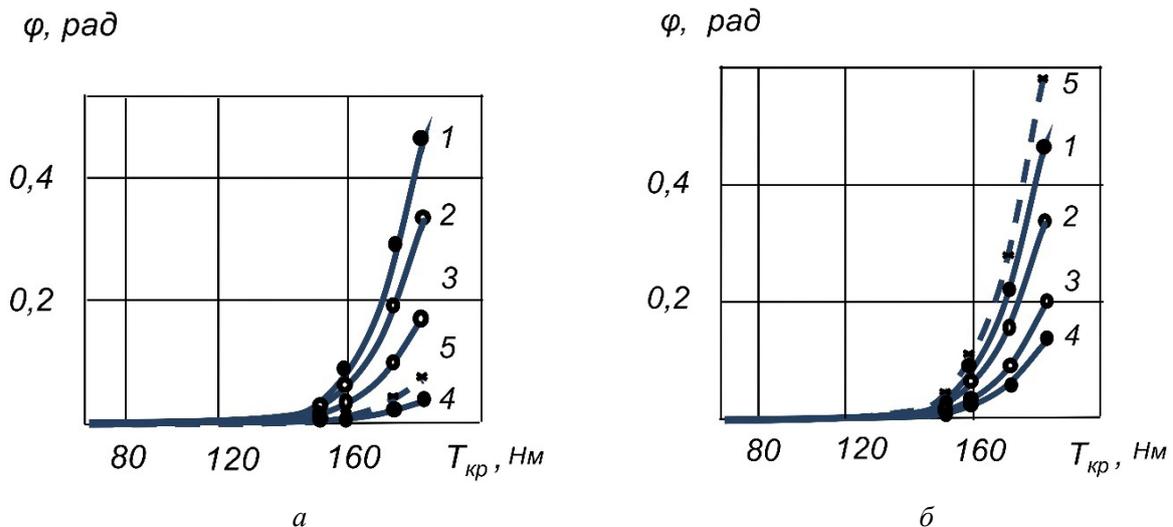


Рис. 7. Амплитудная зависимость коэффициента поглощения для сварных швов соединений: а – сталь 45 + сталь 45; б – сталь 45 + Р6М5

Fig. 7. Amplitude dependence of the absorption coefficient for welded joints: а – steel 45 + steel 45; б – steel 45 + steel R6M5

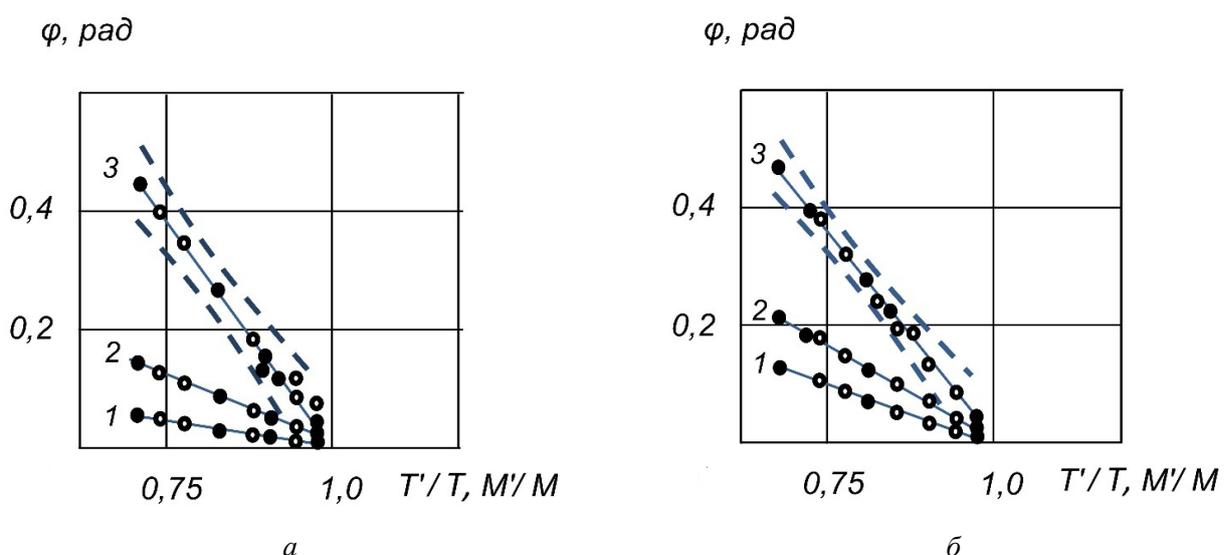


Рис. 8. Связь коэффициента поглощения с относительной прочностью соединения: а – сталь 45 + сталь 45; б – сталь 45 + сталь Р6М5 для различных амплитуд крутящего момента

Fig. 8. Relation between the absorption coefficient and relative strength of the joint: а – steel 45 + steel 45; б – steel 45 + steel R6M5 for different torque amplitudes

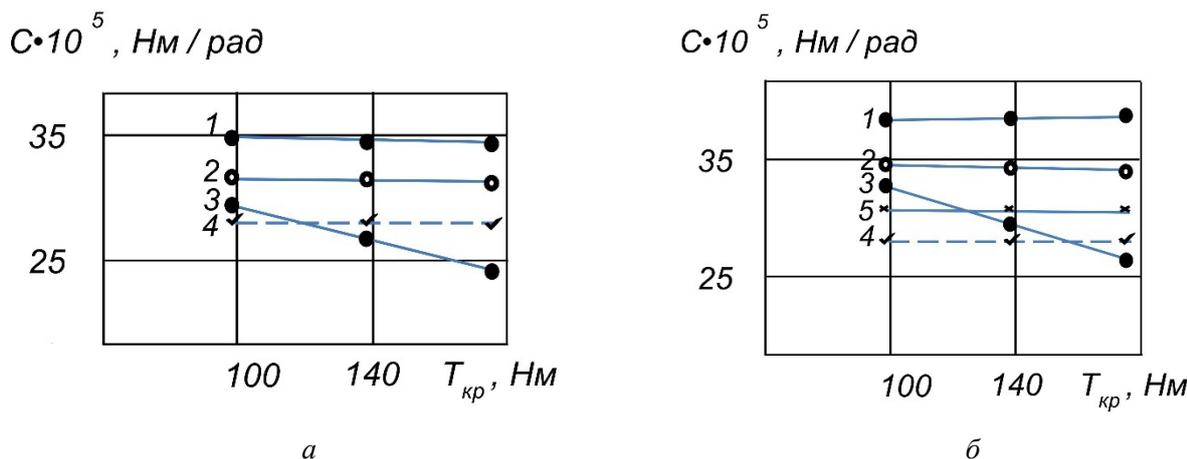


Рис. 9. Амплитудная зависимость жесткости сварных соединений:  
 а – сталь 45 + сталь 45; б – сталь 45 + сталь Р6М5

Fig. 9. Amplitude dependence of stiffness of welded joints:  
 а – steel 45 + steel 45; б – steel 45 + steel R6M5

области. Жесткость соединений, имеющих не-  
 провар, с увеличением амплитуды нагружения  
 уменьшается за счет деформации микровыступов  
 шероховатой поверхности и скольжения эле-  
 ментов контакта. В общем случае зависимость  
 жесткости сварных соединений от амплитуды  
 является нелинейной [2, 3, 9].

При малых амплитудах нагружения жест-  
 кость образцов из стали 45 и Р6М5 может ока-  
 заться меньше жесткости сварных соединений,  
 которые имеют непровар. Это объясняется тер-  
 момеханическим упрочнением материала около-  
 шовной зоны в процессе сварки. Последующий

отжиг полностью не устраняет воздействие цик-  
 ла сварки.

Связь жесткости сварных соединений с отно-  
 сительной прочностью приведена на рис. 10. За-  
 висимости построены при амплитуде крутящего  
 момента  $T = 137,2$  Нм. Штриховыми линиями  
 указана 96%-я доверительная область для тео-  
 ретической линии регрессии. Аналогичная об-  
 ласть строится на всех графиках.

На основании рассмотренных выше экспе-  
 риментальных исследований предлагаются не-  
 разрушающие методы определения прочности  
 стыковых соединений, полученных сваркой дав-

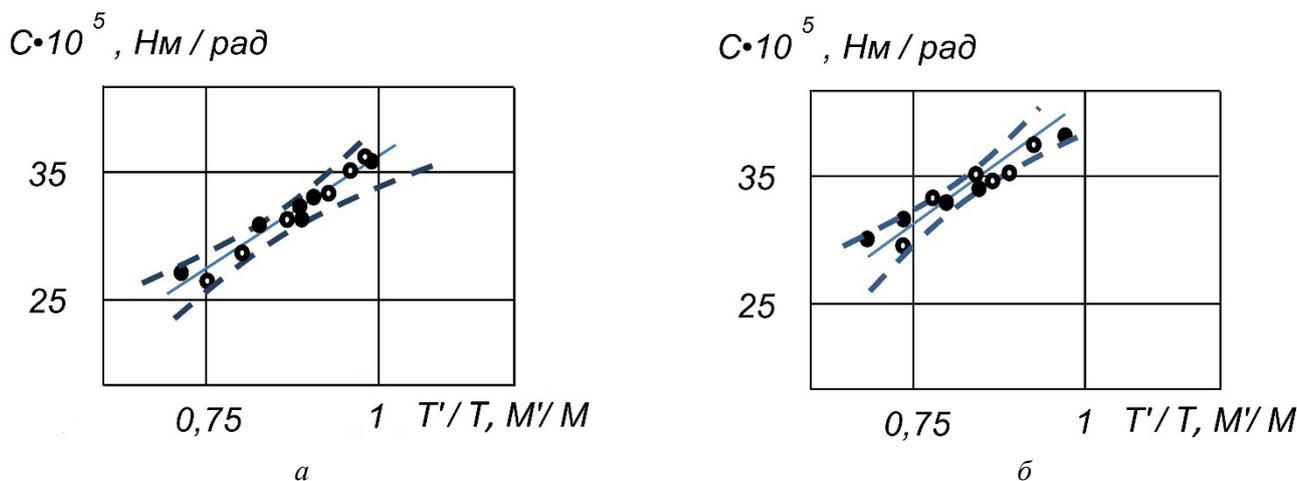


Рис. 10. Связь жесткости сварных соединений с относительной прочностью:  
 а – сталь 45 + сталь 45; б – сталь 45 + сталь Р6М5

Fig. 10. Relation between rigidity and relative strength of welded joints:  
 а – steel 45 + steel 45; б – steel 45 + steel R6M5

лением, по их жесткости и демпфирующей способности [9, 15, 16]. Эти методы основаны на предпосылке, рассматривающей непровар как механический контакт двух твердых тел, который обладает повышенными демпфирующими свойствами. Контроль соединений предлагается осуществлять методом статической петли гистерезиса.

При статическом методе контроля характеристиками для оценки прочности сварных соединений являются коэффициент поглощения, рассеяние энергии и жесткость соединений. По этому методу строятся амплитудные зависимости рассматриваемых характеристик для партии соединений, сваренных на разных режимах. Затем производят разрушение соединений. Далее устанавливается соответствие каждой кривой амплитудной зависимости определенной прочности. По этим данным строятся графики зависимости коэффициента поглощения, рассеяния энергии или жесткости от прочности соединений для определенных амплитуд крутящего момента (рис. 6–8). Эти зависимости и являются основными тарифовочными графиками по определению прочности соединений. Зная рассеяние энергии, коэффициент поглощения или жесткость соединений при определенной амплитуде нагружения, определяют их прочность.

Выбор контролируемых характеристик соединений зависит от конкретных условий. Если

нельзя выдержать точно расстояние между ножами датчиков, то прочность лучше оценивать по коэффициенту поглощения, который не зависит от базы измерения. Если не четко фиксируется амплитуда нагружения, то прочность соединений лучше определять по их жесткости. Кроме того, жесткость соединений изменяется от наличия в них пор, которые уменьшают поперечное сечение, а коэффициент поглощения при этом практически не меняется. Контроль соединений по рассеянию энергии, коэффициенту поглощения и их жесткости связан с большой трудоемкостью обработки опытных данных. Трудоемкость можно уменьшить, если рассеяние энергии оценивать по ширине петли гистерезиса (рис. 11).

Действительно, площадь петли  $W$  можно приближенно представить как площадь двух треугольников с основанием  $\varphi_c$  – шириной петли в радианах и высотой петли – амплитудой закручивающего момента  $T_c$  (Нм).

При одном крутящем моменте для всех образцов рассеяние энергии будет пропорционально ширине петли.

Связь прочности отожженных образцов на кручение с шириной петли механического гистерезиса при амплитуде крутящего момента 176,4 Нм показана на рис. 12, где  $a$  и  $b$  – образцы из стали 45 и Р6М5; «○» и «●» – соответственно соединения, полученные сваркой трением и контактной сваркой. При контроле методом ста-

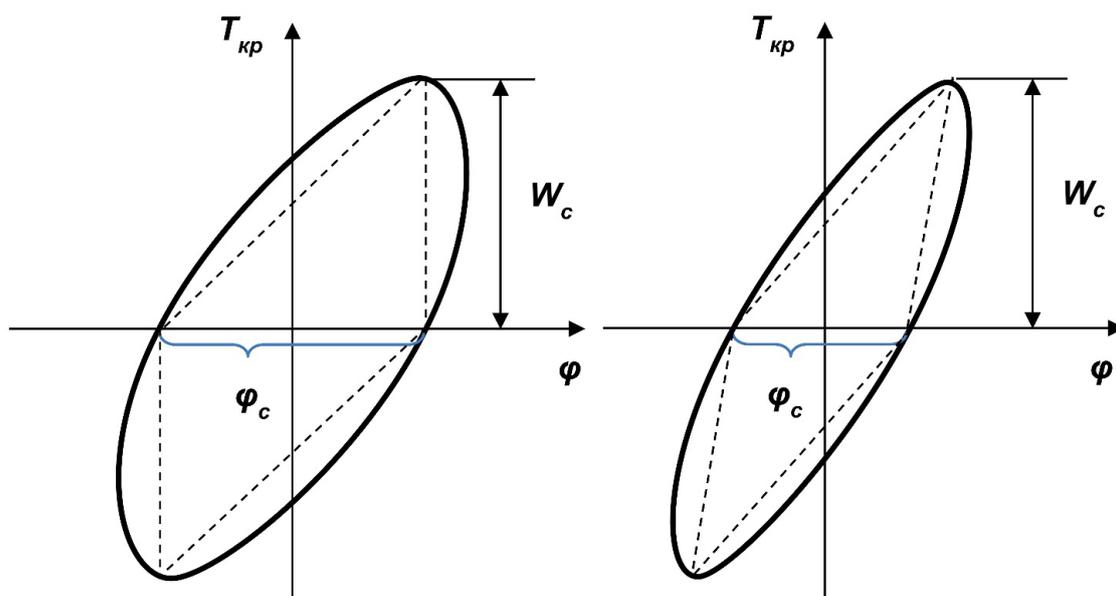


Рис. 11. Петли механического гистерезиса для образцов с различной прочностью

Fig. 11. Mechanical hysteresis loops for specimens with different strengths

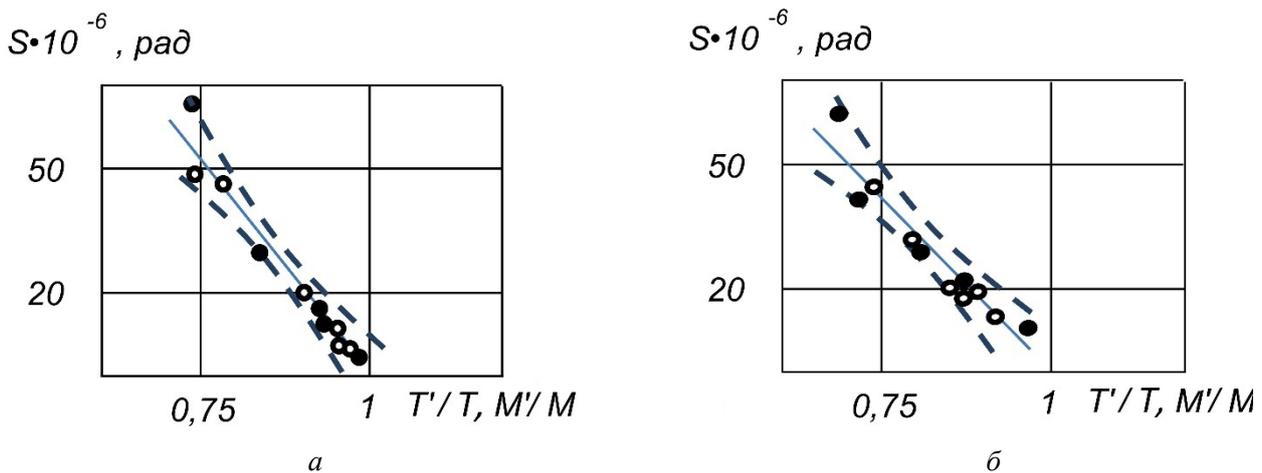


Рис. 12. Связь ширины петли механического гистерезиса с относительной прочностью на кручение для отожженных соединений:

*а* – сталь 45 + сталь 45; *б* – сталь 45 + сталь Р6М5

Fig. 12. Relation between the mechanical hysteresis loop width and relative torsional strength for annealed joints:

*a* – steel 45 + steel 45; *b* – steel 45 + steel R6M5

тической петли гистерезиса для ее замыкания необходимо произвести несколько циклов предварительного нагружения при закручивании, а при изгибных колебаниях – получается автоматически.

С целью выяснения влияния структуры материалов на качество сварного шва были проведены металлографические исследования соединений *сталь 45 + сталь 45* и *сталь 45 + сталь Р6М5*. Металлографический анализ проводился с помощью инструментальных микроскопов при увеличении  $\times 400$ . Травление микрошлифов – стандартное для данных сталей.

Образцы подвергались различным видам термообработки, моделирующим условия формирования структуры сварного шва (температуру и длительность нагрева при сварке, интенсивность охлаждения и др.). Полученные данные позволили уточнить технологические параметры стыковой сварки, а также сварки трением: время нагрева и др. (табл. 1, 2).

### Выводы

Установлено, что с увеличением непровара в сварном шве рассеяние энергии возрастает при одинаковых значениях амплитуды крутящего момента в условиях статического нагружения. Выявлено, что жесткость качественно сваренных соединений остается постоянной, а жест-

кость соединений с непроваром уменьшается с увеличением амплитуды крутящего момента.

Применение метода статической петли гистерезиса помогло установить связь жесткости и демпфирующей способности сварных соединений с их прочностью, что позволяет использовать данный метод как способ неразрушающего контроля для оценки качества стыковых соединений, полученных сваркой давлением.

### Список литературы

1. Leenen R. The modelling and identification of an hysteretic system. The wire-rope as a nonlinear shock vibration isolator / Department of Mechanical Engineering Eindhoven University of Technology. – Technische Universiteit Eindhoven, 2012. – 45 p.
2. Головин И.С. Внутреннее трение и механическая спектроскопия металлических материалов. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2012. – 247 с. – ISBN 978-5-87623-638-8.
3. Danilin A.N., Shalashilin V.I. A method to identify hysteresis by an example of an antigalloping device // International Applied Mechanics. – 2010. – Vol. 46. – P. 588–595. – DOI: 10.1007/s10778-010-0345-x.
4. Esteban J., Rogers C.A. Energy dissipation through joints // Computers & Structures. – 2000. – Vol. 75 (4). – P. 347–359. – DOI: 10.1016/S0045-7949(99)00096-6.
5. Динамика температурного поля и оценка технологических параметров при сварке трением с перемешиванием биметаллических пластин / Р.А. Рзаев, А.У. Джалмухамбетов, В.В. Смирнов, Ш.М. Атуев //

Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 1 (2). – С. 274–278.

6. Quantitative evaluation of residual torque of a loose bolt based on wave energy dissipation and vibro-acoustic modulation / Z. Zhang, M. Liu, Z. Su, Y. Xiao // *Journal of Sound and Vibration*. – 2016. – P. 156–170. – DOI: 10.1016/j.jsv.2016.07.001.

7. Колубаев Е.А. Особенности формирования структуры сварного соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 6. – С. 887–894.

8. Стаценко В.Н., Негода Е.Н., Сухорада А.Е. Исследование тепловложения и температурных полей при сварке трением с перемешиванием // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. – 2017. – № 3 (32). – С. 150–155. – DOI: 10.5281/zenodo.897023.

9. Никулина А.А. Структура и свойства разнородных соединений, полученных методами сварки и наплавки углеродистых и легированных сталей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09. – Новосибирск, 2020. – 37 с.

10. Левихина А.В., Рубцов В.Е., Колубаев Е.А. Мониторинг образования несплошностей методом акустической эмиссии в процессе сварки трением с перемешиванием // *Известия Алтайского государственного университета*. – 2017. – № 4 (96). – С. 39–44. – DOI: 10.14258/izvasu(2017)4-06.

11. Околович Г.А. *Металловедение инструментального производства*. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2020. – 242 с. – ISBN 978-5-7568-1326-5.

12. Анализ дефектов, возникающих при сварке трением с перемешиванием / Е.В. Кривонос, И.К. Черных, Е.Н. Матушко, Е.В. Васильев // *Омский научный вестник*. – 2017. – № 2 (152). – С. 24–27.

13. Получение сварного соединения пластин из титановых сплавов методом сварки трением с перемешиванием / И.К. Черных, Е.В. Васильев, И.Л. Че-

калин, Е.В. Кривонос, Д.С. Макашин // *Динамика систем, механизмов и машин*. – 2018. – Т. 6, № 1. – С. 198–207. – DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-1-198-207.

14. Способы повышения качества швов, полученных при помощи сварки трением с перемешиванием / И.Л. Чекалин, И.К. Черных, Е.В. Кривонос, Е.В. Васильев // *Омский научный вестник*. – 2017. – № 5 (155). – С. 43–46.

15. Tarasov S., Rubtsov V., Kolubaev A. Subsurface shear instability and nanostructuring of metals in sliding // *Wear*. – 2010. – Vol. 268, N 1–2. – P. 59–66. – DOI: 10.1016/j.wear.2009.06.027.

16. Wolf A., Lafarge R., Brosius A. A non-destructive testing method for joints by the measurement of the energy dissipation // *Production Engineering: Research and Development*. – 2019. – Vol. 13. – P. 99–106. – DOI: 10.1007/s11740-018-0860-x.

17. Кульков В.Г., Сыщиков А.А. Внутреннее трение на границах зерен, содержащих протяженные поры // *Письма в Журнал технической физики*. – 2019. – Т. 45, № 3. – С. 23–25. – DOI: 10.21883/PJTF.2019.03.47267.17580.

18. Курицын Д.И. *Сварка трением перемешиванием: исследование влияния технологических факторов процесса на качество соединений, разработка средств оснащения: монография*. – Saarbrücken, Deutschland: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – 162 с. – ISBN 978-3-659-39314-3.

19. Evaluation of fatigue strength based on dissipated energy for laser welds / Y. Ogawa, T. Horita, N. Iwatani, K. Kadoi, D. Shiozawa, T. Sakagami // *Engineering Proceedings*. – 2021. – Vol. 8. – P. 6–12. – DOI: 10.3390/engproc2021008006.

20. Energy dissipation mechanism of inerter systems / Z. Zhao, Q. Chen, R. Zhang, C. Pan, Y. Jiang // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2020. – Vol. 184. – P. 105845. – DOI: 10.1016/j.ijmesci.2020.105845.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



# Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Study of energy dissipation and rigidity of welded joints obtained by pressure butt welding

Anatoly Maytakov<sup>a, \*</sup>, Alexey Grachev<sup>b</sup>, Anatoly Popov<sup>c</sup>, Sergey Li<sup>d</sup>,  
Nadezhda Vetrova<sup>e</sup>, Konstantin Plotnikov<sup>f</sup>

Kemerovo State University, 6 Krasnaya st., Kemerovo, 650000, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-0714-204X>,  [may585417@mail.ru](mailto:may585417@mail.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0009-0008-3997-5282>,  [kafedra.mats@yandex.ru](mailto:kafedra.mats@yandex.ru),  
<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0728-7211>,  [popov4116@yandex.ru](mailto:popov4116@yandex.ru), <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-7174-2501>,  [li@kemsu.ru](mailto:li@kemsu.ru),  
<sup>e</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7131-0511>,  [veteroknadi@mail.ru](mailto:veteroknadi@mail.ru), <sup>f</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-4145-0027>,  [k.b.plotnikov@mail.ru](mailto:k.b.plotnikov@mail.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 07 April 2023

Revised: 15 April 2023

Accepted: 17 May 2023

Available online: 15 September 2023

#### Keywords:

Weld seam

Butt welding

Lack of welding penetration

Hysteresis

Energy dissipation

#### Acknowledgements

Research was partially conducted at core facility “Structure, mechanical and physical properties of materials”.

### ABSTRACT

**Introduction.** When studying the energy dissipation associated with internal friction in a weld, it is extremely important to choose a measurement technique, since the reliability and integrity of the data obtained depends on it. At the same time, it is necessary to investigate the change in internal friction depending on the presence of defects in the weld. Of the variety of methods for non-destructive testing of joints obtained by pressure welding, only ultrasonic is currently used. However, lightly oxidized lacks of welding penetration are not detected, which can be detected only in the presence of other defects accompanying it. Compounds of dissimilar materials are not controlled by ultrasound at all. Therefore, the development of non-destructive testing methods for such compounds is very relevant. **The purpose of the work:** to find a procedure for testing the quality of a welded joint in metals and alloys that will be a quick and simple alternative to the known methods of non-destructive testing, by measuring the energy dissipation in the weld of the sample by the static hysteresis loop method. **The method of investigation** is non-destructive quality control of the welded joint in metals and alloys by measuring the energy dissipation in the weld of the sample by the static hysteresis loop method. **Results and discussion.** It is established that with an increase in the lacks of welding penetration, the energy dissipation increases at the same values of the torque amplitude under static loading conditions. The rigidity of the qualitative welded joints remains constant, and the joints with lacks of welding penetration decrease with increasing torque amplitude. The relationship of strength with stiffness and damping ability obtained by the static hysteresis loop method is preserved for various structural states of the sample material.

**For citation:** Maytakov A.L., Grachev A.V., Popov A.M., Li S.R., Vetrova N.T., Plotnikov K.B. Study of energy dissipation and rigidity of welded joints obtained by pressure butt welding. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 104–116. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-104-116. (In Russian).

### References

1. Leenen R. The modelling and identification of an hysteretic system. The wire-rope as a nonlinear shock vibration isolator. Department of Mechanical Engineering Eindhoven University of Technology. Technische Universiteit Eindhoven, 2012. 45 p.
2. Golovin I.S. Vnutrennee trenie i mekhanicheskaya spektroskopiya metallicheskih materialov [Internal friction and mechanical spectroscopy of metallic materials]. Moscow, MISiS Publ., 2012. 247 p. ISBN 978-5-87623-638-8.
3. Danilin A.N., Shalashilin V.I. A method to identify hysteresis by an example of an antigalloping device. *International Applied Mechanics*, 2010, vol. 46, pp. 588–595. DOI: 10.1007/s10778-010-0345-x.
4. Esteban J., Rogers C.A. Energy dissipation through joints. *Computers & Structures*, 2000, vol. 75 (4), pp. 347–359. DOI: 10.1016/S0045-7949(99)00096-6.

#### \* Corresponding author

Maytakov Anatoly L., Ph.D. (Engineering), Professor

Kemerovo State University,

6 Krasnaya st.,

650000, Kemerovo, Russian Federation

Tel.: +7 (3842) 39-68-40, e-mail: [may585417@mail.ru](mailto:may585417@mail.ru)

5. Rzaev R.A., Dzhalmukhambetov A.U., Smirnov V.V., Atuev Sh.M. Dinamika temperaturnogo polya i otsenka tekhnologicheskikh parametrov pri svarke treniem s peremeshivaniem bimetallicheskih plastin [The temperature field dynamics and estimation of technological parameters at welding by friction with hashing of bimetallic plates]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 18, no. 1 (2), pp. 274–278.
6. Zhang Z., Liu M., Su Z., Xiao Y. Quantitative evaluation of residual torque of a loose bolt based on wave energy dissipation and vibro-acoustic modulation. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, pp. 156–170. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.07.001.
7. Kolubaev E.A. Osobennosti formirovaniya struktury svarnogo soedineniya, poluchennogo svarkoi treniem s peremeshivaniem [Features of the formation of the structure of a welded joint obtained by friction stir welding]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*, 2013, no. 6, pp. 887–894.
8. Statsenko V.N., Negoda E.N., Sukhorada A.E. Issledovanie teplovlozheniya i temperaturnykh polei pri svarke treniem s peremeshivaniem [An investigation of heat input and temperature fields in friction stir welding]. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta = Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin*, 2017, no. 3 (32), pp. 150–155. DOI: 10.5281/zenodo.897023.
9. Nikulina A.A. *Struktura i svoystva raznorodnykh soedinenii, poluchennykh metodami svarki i naplavki uglerodistykh i legirovannykh staley*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Structure and properties of dissimilar joints obtained by welding and surfacing of carbon and alloy steels. Dr. eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2020. 37 p.
10. Levihina A.V., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Monitoring obrazovaniya nesploshnostei metodom akusticheskoi emissii v protsesse svarki treniem s peremeshivaniem [Defect formation monitoring using acoustic emission method during friction stir]. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta = Izvestiya of Altai State University*, 2017, no. 4 (96), pp. 39–44. DOI: 10.14258/izvasu(2017)4-06.
11. Okolovich G.A. *Metallovedenie instrumental'nogo proizvodstva* [Metal science of tool production], Barnaul, AltSTU Publ., 2020. 242 p. ISBN 978-5-7568-1326-5.
12. Krivonos E.V., Chernykh I.K., Matuzko E.N., Vasiliev E.V. Analiz defektov, vznikayushchikh pri svarke treniem s peremeshivaniem [Analysis of defects caused by friction welding with stirs]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2017, no. 2 (152), pp. 24–27. (In Russian).
13. Chernykh I.K., Vasil'ev E.V., Chekalin I.L., Krivonos E.V., Makashin D.S. Poluchenie svarnogo soedineniya plastin iz titanovykh splavov metodom svarki treniem s peremeshivaniem [Welded joint of titanium plates manufacturing by friction stir welding]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin = Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 2018, vol. 6, no. 1, pp. 198–207. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-1-198-207.
14. Chekalin I.L., Chernykh I.K., Krivonos E.V., Vasiliev E.V. Sposoby povysheniya kachestva shvov, poluchennykh pri pomoshchi svarki treniem s peremeshivaniem [Methods of upgrading the quality of friction stir welds]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2017, no. 5 (155), pp. 43–46. (In Russian).
15. Tarasov S., Rubtsov V., Kolubaev A. Subsurface shear instability and nanostructuring of metals in sliding. *Wear*, 2010, vol. 268, no. 1–2, pp. 59–66. DOI: 10.1016/j.wear.2009.06.027.
16. Wolf A., Lafarge R., Brosius A. A non-destructive testing method for joints by the measurement of the energy dissipation. *Production Engineering: Research and Development*, 2019, vol. 13, pp. 99–106. DOI: 10.1007/s11740-018-0860-x.
17. Kul'kov V.G., Syshchikov A.A. Vnutrennee trenie na granitsakh zeren, sodержashchikh protyazhennye pory [Internal friction at grain boundaries elongated pores]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Technical Physics Letters*, 2019, vol. 45, no. 3, pp. 23–25. DOI: 10.21883/PJTF.2019.03.47267.17580. (In Russian).
18. Kuritsyn D.I. *Svarka treniem peremeshivaniem: issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov protsessa na kachestvo soedinenii, razrabotka sredstv osnashcheniya* [Friction stir welding: Study of the influence of technological factors of the process on the quality of joints, development of equipment]. Saarbrücken, Deutschland, LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 162 p. ISBN 978-3-659-39314-3.
19. Ogawa Y., Horita T., Iwatani N., Kadoi K., Shiozawa D., Sakagami T. Evaluation of fatigue strength based on dissipated energy for laser welds. *Engineering Proceedings*, 2021, vol. 8, pp. 6–12. DOI: 10.3390/engproc2021008006.
20. Zhao Z., Chen Q., Zhang R., Pan C., Jiang Y. Energy dissipation mechanism of inverter systems. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, vol. 184, p. 105845. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105845.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.