

электродуговой сварки и резки металлов в СССР // Тр. Всесоюз. конф. – К.: Наук. думка, 1982. – С. 110–116. 8. *Петров А.В., Седых А.В., Хорбуст Л.С.* Плазменная сварка алюминиевых сплавов полым анодом // IV Всесоюз. конф. "Сварка цветных металлов". – Мариуполь: ПГТУ, 1990. – С. 32–33. 9. *Грановский А.В.* Особенности применения порошковой проволоки для плазменной наплавки с аксиальной подачей плавящегося электрода // Всесоюз. науч.-техн. конф. "Славянские чтения". – Пермь, 1986. – С. 60.

Надійшла до редколегії 22.09.09

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК

д-р техн. наук, проф. В.Ф. Квасницький

УДК 621.791.05

О-60

*Г.В. Ермолаев, канд. техн. наук, проф. НУК;*

*В.А. Мартыненко, канд. техн. наук;*

*О.А. Корнукий, студентка магистратуры*

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ КАТЕТОВ ТАВРОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Приведен анализ нормативных требований к минимальным и максимальным катетам тавровых сварных соединений. Показано, что не всегда требования к минимальной величине катета достаточно обоснованы. Предложено назначать минимальные катеты расчетом с учетом фактического химического состава основного металла или по максимальному нормативному содержанию элементов.

Проаналізовано нормативні вимоги до мінімальних і максимальних катетів таврових зварних з'єднань. Показано, що не завжди вимоги до мінімальної величини катета достатньо обґрунтовані. Запропоновано призначати мінімальні катети розрахунком з урахуванням фактичного хімічного складу основного металу або за максимальним нормативним змістом елементів.

The analysis of normative requirements is resulted to the minimum and maximal leg of t-shaped welding connections. It is retined that not always requirement to the minimum size of leg grounded enough. It is suggested to appoint minimum leg a calculation taking into account actual chemical composition of parent metal or on maximal normative maintenance of elements.

*Ключевые слова:* катет шва, сварное соединение, тавровое соединение.

**Постановка задачи.** Тавровые соединения в сварных металлоконструкциях занимают первое место по протяженности: в корпусе судна они составляют до 80...85% [1], в строительных металлоконструкциях (балках, стойках, рамах, перекрытиях и т. п.) их доля еще больше. С точки зрения степени ответственности все эти соединения принято делить на рабочие и связующие [2]. Первые предназначены для передачи нагрузки с одного элемента конструкции на другой (например, соединения в узлах пересечения или притыкания балок), вторые только объединяют эти элементы в единое целое (так называемые поясные швы) и практически не участвуют в передаче рабочих нагрузок. Естественно, что и требования к размерам этих швов различны.

Рабочие соединения должны назначаться из условий достаточной прочности, если нагрузка на них меньше, чем на основной металл, или равнопрочности, если они несут такую же нагрузку. Превышение катета сверх необходимого нежелательно, так как, не увеличивая несущей способности узла, оно существенно повышает затраты на сварку. Занижение катета, наоборот, уменьшает прочность узла, что недопустимо. Катеты связующих соединений должны назначаться минимальными, исходя из конструктивно-технологических соображений.

Отнесение сварного соединения к той или иной группе и определение степени ответственности (загруженности) того или иного соединения иногда устанавливаются нормами на проектирование, как это делается, например, в Правилах классификационных обществ в судостроении [3–6]. Однако в связи с многообразием сварных металлоконструкций в других отраслях промышленности в большинстве случаев решать эту задачу приходится проектантам или технологам. Очень часто вследствие отсутствия опыта, а чаще нежелания брать на себя ответственность, последние идут по пути назначения как можно больших размеров катетов или необоснованного применения соединений со скосом кромок, обеспечивающим полное проплавление по толщине присоединяемого элемента. Естественно, это приводит к существенному увеличению расходов на сварку (расхода сварочных материалов, электроэнергии, трудоемкости сварки и последующего устранения сварочных деформаций). Поэтому данная работа является **актуальной**.

**Цель настоящей работы** – разработка рекомендаций по назначению оптимальных размеров катетов связующих тавровых соединений при сварке низколегированных и низкоуглеродистых сталей.

**Изложение основного материала.** Из различных тавровых соединений наиболее распространены соединения типа ТЗ (двусторонние, непрерывные, без скоса кромок) [7–9], что объясняется их достаточно высокой прочностью в сочетании с высокой технологичностью и экономичностью по сравнению с другими. Основными параметрами соединения ТЗ, назначаемыми при проектировании, является катет шва  $k$  (в отечественной практике) или расчетная толщина  $a$  (в соответствии с Европейскими Нормами). Последняя однозначно связана с катетом и в большинстве случаев принимается  $a = 0,7k$  [2–6]. Необходимая величина  $k$  или  $a$  для рабочих соединений должна определяться расчетом прочности, а для связующих – назначаться проектантом или технологом по рекомендациям норм и стандартов. И в том и в другом случаях последние устанавливают величины минимального и максимального катетов (толщин шва). В отечественных стандартах [7–9] эти величины приводятся в приложениях и имеют рекомендательный характер, а в Строительных Нормах [10], Правилах классификационных обществ [3–6], Европейских Нормах [11] и в Американском стандарте [12] они включены в основной текст документов и рассматриваются как обязательные. Сравнение требований указанных документов показывает, что в них много общего, но есть и различия.

Практически во всех Нормах основными параметрами, определяющими величину катета (расчетную толщину), являются минимальная из соединяемых толщин  $s_{\min}$  для максимального катета и максимальная из соединяемых толщин  $s_{\max}$  – для минимального. Исключения составляют Правила классификационных обществ. Так, в Правилах Германского Ллойда [4] при назначении минимального катета учи-

тывают как максимальную  $s_{\max}$ , так и минимальную  $s_{\min}$  толщины соединяемых деталей и минимальный катет определяют по эмпирической формуле

$$k_{\min} = 1,4 \sqrt{\frac{s_{\min} + s_{\max}}{3}}, \text{ где все размеры в миллиметрах. В Правилах Российского}$$

Морского Регистра [3] величина минимального катета устанавливается в зависимости от минимальной толщины. Обычно это толщина притыкаемого элемента и составляет 4 мм для толщин от 4 до 10 мм, 5 мм для толщин от 11 до 15 мм и  $0,35s_{\min}$  для больших толщин. При соединении деталей с большой разницей минимальной и максимальной толщин ( $\geq 2$  раза) назначение катета требует отдельного согласования с Регистром.

Максимальный катет ограничивается Нормами в зависимости от величины минимальной толщины  $s_{\min}$  [3–6, 11, 12] или  $1,2s_{\min}$  [7–10], что определяется, очевидно, чисто экономическими соображениями. Действительно, несложные расчеты показывают, что уже при катете, равном толщине привариваемого элемента, площадь расчетного сечения соединения типа ТЗ длиной  $l$ , составляющая  $2,0,7kl$ , в 1,4 раза превышает площадь сечения основного металла  $sl$ . Поэтому при работе на срез такое соединение имеет избыточную прочность, а при отрыве оно практически равнопрочно основному металлу.

Учитывая это, Германский стандарт, принятый в качестве Европейских Норм [11], прямо указывает, что при  $k \geq 0,7s$  для сталей нормальной прочности и  $k \geq s$  для сталей повышенной прочности и приварке по всему периметру притыкания проверка прочности таврового соединения не требуется. Естественно, вопрос назначения катета, близкого к максимальному, целесообразно ставить только для рабочих соединений и решаться он должен, прежде всего, прочностным расчетом. Оптимальным можно считать только сварной узел с соединениями *достаточной* прочности. Поскольку площадь наплавленного металла пропорциональна квадрату катета, любое его необоснованное завышение приводит к значительному увеличению затрат на сварку и снижает экономические показатели конструкции.

С учетом этого катеты связующих соединений, т. е. соединений, практически не передающих нагрузку, необходимо назначать по *минимальным* значениям, устанавливаемым или рекомендуемым нормативными документами.

Как отмечалось, основным критерием, определяющим величину минимального катета, в большинстве случаев является большая из толщин соединяемых деталей (табл. 1). Анализ таблицы показывает, что требования различных Норм во многом совпадают, но есть и отличия. До толщины 20 мм включительно разница в величине минимального катета по всем Нормам не превышает 1 мм.

Нормы обычно не поясняют, из каких соображений в качестве критерия для назначения минимального катета выбрана именно максимальная толщина. Только в Американском стандарте [12] это мотивируется ограничением скорости охлаждения металла ЗТВ и содержания мартенсита в этой зоне. Очевидно, этот фактор можно считать обоснованным только в том случае, если сварка шва указанного катета выполняется за один проход, так как скорость охлаждения определяется погонной энергией одного прохода. Поэтому *назначение минимальных катетов*

выше 8 мм, которые завариваются обычно более чем за один проход, нецелесообразно.

**Таблица 1. Минимальные катеты, мм, в зависимости от максимальной толщины, мм, соединяемых элементов (для стали с  $\sigma_t \leq 400$  МПа) по нормативным документам**

Нормативный документ	$s_{max}$ , мм												
	5	6...8	9...10	11...13	14...16	17...19	20	22	24...26	28...32	34	36...38	40
[7, 10]	3	4	4	5	5	6	6	6	7	7	8	8	8
[8, 9, 10]	4	5	5	6	6	7	7	7	8	8	9	9	9
[11]	2	3	4	4	5	5	6	6	6	7	7	8	8
[12]	3	4	5	5	6	6	6	8	8	8	8	8	10
Расчетные значения $k_{min}$ для сварки*													
УП	4	5	6	6	7	8	8	8	9	10	–	–	–
АФ	3	4	4	5	5	6	6	6	7	7	–	–	–
РДС	3	4	5	5	6	7	7	7	8	8	–	–	–

\*УП – в углекислом газе; АФ – автоматическая под флюсом; РДС – ручная дуговая.

Кроме того, на скорость охлаждения влияет и соотношение соединяемых толщин. С этой точки зрения более логичны ограничения Правил Германского Ллойда [4], учитывающие как максимальную, так и минимальную толщины соединяемых элементов.

Для оценки влияния толщины привариваемого элемента авторами выполнен анализ скорости охлаждения при сварке тавровых соединений типа ТЗ.

Погонная энергия сварки рассчитывалась по формуле  $q_{II} = k_w F_H$  [13], где  $k_w$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий способ сварки (коэффициент наплавки) и равный  $64500 \text{ Дж/см}^3$  для ручной сварки покрытыми электродами и под флюсом и  $37500 \text{ Дж/см}^3$  – для сварки в углекислом газе;  $F_H$  – площадь наплавленного металла,  $\text{см}^2$ , рассчитываемая по формуле  $F_H = k_b k^2 / 2$ ;  $k$  – катет шва, см;  $k_b$  – коэффициент, учитывающий выпуклость шва, в дальнейших расчетах он принимался равным 1,5 для сварки в углекислом газе и ручной дуговой сварки покрытыми электродами и 1,2 – для сварки под флюсом.

Таким образом, зависимость между погонной энергией и катетом углового шва при сварке получает вид  $q_{II} = k_b k_w k^2 / 2$  или

$$k = \sqrt{\frac{2q_{II}}{k_b k_w}} = \frac{\sqrt{q_{II}}}{k_k}, \quad (1)$$

где  $k_k = \sqrt{\frac{k_b k_w}{2}}$  – коэффициент, учитывающий выпуклость углового шва и способ сварки и равный 168 для сварки в углекислом газе, 220 – для ручной сварки покрытыми электродами и 197 – для сварки под флюсом.

Часть погонной энергии, идущая на нагрев полки (неразрезной связи),  $q_{II,II}$  вы-

числялась по формуле  $q_{п.п} = k_{п} q_{п}$ , где  $k_{п} = \frac{2s_{п}}{2s_{п} + s_{р}}$  – коэффициент, учитывающий

трехмерный отвод тепла [14]. Нетрудно видеть, что при изменении толщины приварного элемента от  $s_{п}$  до 0 этот коэффициент изменяется от 0,67 до 1.

Время охлаждения от 850 до 500 °С определялось для схемы однопроходной сварки листов (нагрев тонкого слоя линейным источником) по формуле [15]

$$\tau = \frac{k_{п}^2 q_{п}^2}{4\pi\lambda c\rho s_{п}^2} \left[ \frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(850 - T_0)^2} \right], \quad (2)$$

где  $k_{п} q_{п}$  – погонная энергия сварки, идущая на нагрев пластины (с учетом трехмерного отвода теплоты), Дж/см;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Дж/(см·с·град);  $c\rho$  – объемная теплоемкость, Дж/(см<sup>3</sup>·град);  $T_0$  – начальная температура изделия, °С.

Расчеты выполнены для сварки в углекислом газе угловых швов тавровых соединений с катетами от 4 до 8 мм деталей толщиной  $s_{п}$  (пластина) от 8 до 20 мм и  $s_{р}$  (ребро) от 0 до  $s_{п}$  из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Теплофизические свойства принимались следующие: коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,4$  Дж/(см·с·град), объемная теплоемкость  $c\rho = 4,75$  Дж/(см<sup>3</sup>·град).

Коэффициент выпуклости принят  $k_{в} = 1,5$ , поэтому погонная энергия при заварке угловых швов катетом 5 и 8 мм составила соответственно 7000 и 18000 Дж/см.

Полученные зависимости времени охлаждения ЗТВ (850...500 °С) от свариваемых толщин и катетов приведены на рис. 1. Анализ кривых показывает, что минимальное время охлаждения составляет 4 с при толщине листа 8 мм и катете 4 мм. Это время уменьшается до 2,5 с при наличии приварного элемента. С увеличением толщины листа и катета до 12 и 5 мм соответственно время охлаждения увеличивается до 4,5 с без учета трехмерного теплоотвода в приварной элемент и 3,0 с при

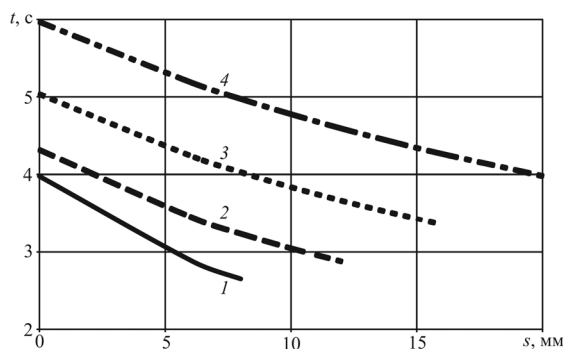


Рис. 1. Зависимость времени остывания (850...500 °С) от толщины приварного элемента при толщине листа и катете, мм:

8 и 4 (1), 12 и 5 (2), 16 и 6 (3) и 20 и 7 (4)

учете последнего. Максимальное время охлаждения соответствует сварке листа 20 мм катетом 7 мм, где оно составляет 6 и 4 с.

Таким образом, назначаемые нормами минимальные катеты мало привязаны к ограничению скорости охлаждения. На малых толщинах и соответствующих им катетах время охлаждения в диапазоне 850...500 °С значительно меньше, чем на больших толщинах. Во всех случаях это время уменьшается на 1...2 с при увеличении толщины приварного элемента.

Для решения вопроса о минимальном катете можно использовать выражение для времени остывания, обеспечивающем получение в ЗТВ 50 % мартенсита [15]:

$$\ln \tau_M = -2,1 + 15,5C + 0,96Mn + 0,84Si + 0,65Cr + 0,74Mo + 0,55Ni + \\ + 0,3V + 4,0Al + 0,5W + 0,8Cu - 0,25Nb - 13,5C^2 - 0,8Si^2,$$

откуда, обозначив правую часть выражения через М, получим

$$\tau_M = \exp(M). \quad (3)$$

Приравняв правые части выражений (2) и (3), будем иметь

$$\exp(M) = \frac{k_n^2 q_n^2}{4\pi\lambda c\rho s^2} \left[ \frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(850 - T_0)^2} \right],$$

тогда выражение для погонной энергии, обеспечивающей получение в ЗТВ 50 % мартенсита, примет вид

$$q_n > \frac{s}{k_n} \sqrt{\frac{4\pi\lambda c\rho \cdot \exp(M)}{\left[ \frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(850 - T_0)^2} \right]}}.$$

Учитывая зависимость между катетом и погонной энергией (1), запишем выражение для катетов, обеспечивающих содержание мартенсита 50 %:

$$k > \sqrt{\frac{s}{k_n}} \left\{ \frac{4\pi\lambda c\rho \cdot \exp(M)}{\left[ \frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(850 - T_0)^2} \right]} \right\}^{\frac{1}{4}} / k_k. \quad (4)$$

По полученным выражениям был выполнен расчет минимальных катетов для низкоуглеродистой и низколегированной сталей марок Ст3 и 09Г2. При этом для каждой стали рассматривались три варианта химического состава, соответствующих минимальному (1), среднему (2) и максимальному (3) содержанию элементов (табл. 2). Результаты расчета приведены в виде графиков на рис. 2.

Таблица 2. Химический состав низкоуглеродистой и низколегированной сталей, %

Марка стали	Вариант	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu
Ст3	1	0,140	0,400	0,120	–	–	–
	2	0,160	0,525	0,210	0,150	0,150	–
	3	0,220	0,650	0,300	0,300	0,300	–
09Г2	1	0,080	1,400	0,170	–	–	–
	2	0,100	1,600	0,220	0,150	0,150	0,150
	3	0,120	1,800	0,370	0,300	0,300	0,300

Анализ графиков показывает, что различие химического состава сталей Ст3 и 09Г2 мало влияет на величину минимально необходимого катета (менее 0,5 мм), тогда как изменение фактического химического состава стали в пределах, установленных нормами (стандартами), изменяет его величину на 2...3 мм. Очевидно, что для уменьшения риска получения соединения с пониженной трещиностойкостью при назначении минимального катета целесообразно, с точки зрения ограничения скорости охлаждения и образования мартенсита в ЗТВ, исходить из максимального содержания элементов.

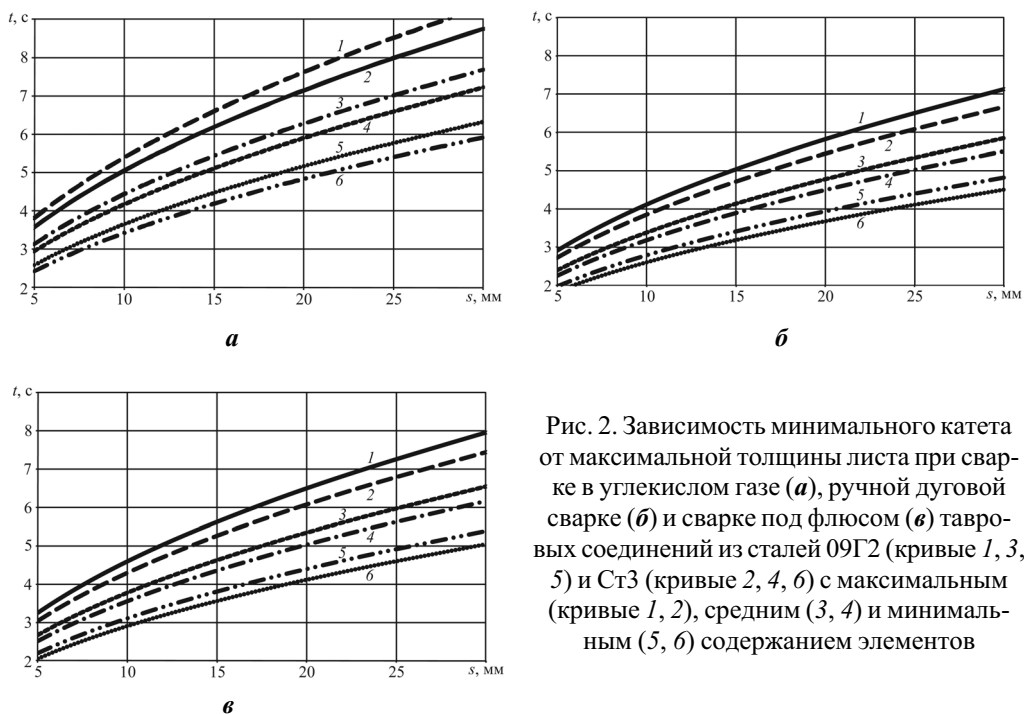


Рис. 2. Зависимость минимального катета от максимальной толщины листа при сварке в углекислом газе (а), ручной дуговой сварке (б) и сварке под флюсом (в) тавровых соединений из сталей 09Г2 (кривые 1, 3, 5) и Ст3 (кривые 2, 4, 6) с максимальным (кривые 1, 2), средним (3, 4) и минимальным (5, 6) содержанием элементов

Сравнение величин минимальных катетов для разных способов сварки показывает, что при сварке в углекислом газе они несколько больше, – это можно объяснить пониженной погонной энергией за счет высокого коэффициента наплавки. Соответственно, при ручной дуговой сварке они минимальны за счет меньшего значения коэффициента наплавки.

На основании приведенных расчетов рекомендуются величины минимальных катетов (см. табл. 1). Как видно из таблицы, устанавливаемые нормативными документами минимальные катеты, как правило, занижены и не гарантируют ограничение содержания мартенсита в ЗТВ и получение сварного соединения с высокой трещиностойкостью.

**Выводы.** 1. Одним из основных критериев, определяющих величину минимального катета таврового соединения, является скорость охлаждения металла ЗТВ в диапазоне температур 850..500 °С. 2. Скорость охлаждения, приводящая к образованию 50 % и более мартенсита в ЗТВ, а следовательно, и минимальный катет существенно зависят от фактического содержания элементов в стали. 3. Суще-

ствующие нормативные ограничения минимальной величины катета часто оказываются заниженными и не обеспечивают получение достаточно высокой трещиностойкости сварного соединения. Не гарантирует этого при сварке больших толщин (свыше 20 мм) и назначение минимальных катетов выше 8 мм, которые завариваются обычно более чем за один проход.

**Список использованной литературы.** 1. Бельчук Г.А., Гатовский К.М., Кох Б.А. Сварка судовых конструкций. – Л.: Судостроение, 1980. – 448 с. 2. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций. – М.: Высшая школа, 1971. – 760 с. 3. Российский Морской Регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Морской Регистр, 2008. – 540 с. 4. Germanischer Lloyd (GL) Rules for Classification and Construction. Materials and Welding. – Hamburg.: Germanischer Lloyd Aktiengesellschaft, 2009. 5. Правила Норвежского бюро Веритас, 1992. 6. ABS Rules for building and classing. Materials and welding PART 2. – Houston.: American Bureau of Shipping, 2009. 7. ГОСТ 8713–79. Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 1986. 8. ГОСТ 5264–80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 1981. 9. ГОСТ 14771–76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 1983. 10. Строительные нормы и правила. СНиП 11-23. 11. DIN 18800. Ч. 1: Стальные конструкции. Выбор параметров и конструирование, 1990. 12. AWS D1.1/D1.1M:2006. An American National Standard – Structural Welding Code – Steel. 13. Кузьминов С.А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. – Л.: Судостроение, 1974. – 288 с. 14. Окерблом Н.О., Демянцева В.П., Байкова И.П. Проектирование технологии изготовления сварных конструкций. – Л.: Судпромгиз, 1963. – 604 с. 15. Касаткин О.Г., Зайфарт П. Интерполяционные модели для оценки фазового состава зоны термического влияния при дуговой сварке низколегированных сталей // Автоматическая сварка. – 1984. – № 1. – С. 7–11.

Надійшла до редколегії 25.11.09  
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. В.Ф. Квасницький

УДК 621.791

М 33

М.В. Матвієнко, аспірант

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

## СТРУКТУРА І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ З'ЄДНАНЬ СТАЛЕЙ 10895 ТА 12X18H10T ПРИ ДИФУЗІЙНОМУ ЗВАРЮВАННІ У ВАКУУМІ

Досліджено структуру, хімічний склад та механічні властивості зварних з'єднань. Вони відповідають технічним вимогам. Виготовлено за новою технологією з термоцикуванням та успішно випробувано промислові деталі.

Исследовано структуру, химический состав и механические свойства сварных соединений. Они отвечают техническим требованиям. Изготовлены по новой технологии с термоциклированием и успешно испытаны промышленные детали.