

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

УДК 629.514

М. С. Горохов,
аспирант,
ФБОУ ВПО Волжская государственная
академия водного транспорта

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ФИБРОБЕТОНА СО СТАЛЬНОЙ АНКЕРНОЙ ФИБРОЙ

CRACKING RESISTANCE OF FIBER REINFORCED CONCRETE WITH STEEL ANCHOR FIBER

В статье представлено аналитическое исследование процесса трещинообразования в опытных образцах, изготовленных из фибробетона с добавлением стальной анкерной фибры длиной 60 мм. Проведен сравнительный анализ существующих методик расчета ширины раскрытия трещин в фибробетонном композите. Предложена методика расчета ширины раскрытия трещины исходя из условий работы композита на различных стадиях трещинообразования.

The article contains analytical investigation of crack formation process in samples, made from fiber reinforced concrete with steel anchor fiber. Fiber length is 60 mm. Comparative analysis of existing methods of crack width calculation in fiber reinforced concrete composite is carried out. We suggest a method of crack width calculation, depending on conditions of exploitation of composite on different stages of crack formation.

Ключевые слова: фибробетон, корпусные конструкции, трещины, фибра, методика, комбинированное армирование, напряжения, изгибающий момент, анкеровка.

Key words: fiber reinforced concrete, hull structures, cracks, fiber, methods, combined reinforcement, tensioning, bending moment, anchoring.



ФИБРОБЕТОН рассматривается как перспективный материал для судов из железобетона, поэтому его качества как судостроительного материала представляют значительный интерес.

С целью уточнения методики расчета ширины раскрытия трещин в сталефибробетонных судовых корпусных конструкциях с комбинированным армированием были проведены испытания опытных образцов-плит, моделирующие характер работы наружной обшивки железобетонного корпуса судна [1, с. 68–73].

Экспериментальное исследование процесса трещинообразования в фибробетоне проводилось при четырех типах фибры — стальной анкерной длиной 60 и 30 мм, базальтовой и синтетической. По результатам испытаний была построена зависимость ширины раскрытия трещин от действующего изгибающего момента для всех типов опытных образцов. Осредненные значения ширины раскрытия трещин для каждого типа фибры и действующие изгибающие моменты представлены на рис. 1.

Анализ полученных зависимостей позволил сделать вывод о том, что наилучшую стойкость к образованию трещин и наименьшую ширину их раскрытия имеют образцы, армированные стальной анкерной фиброй длиной 60 мм. Данная фибра, как наилучшая с точки зрения трещиностойкости и технологичности, рекомендуется к применению.

Для решения задач практического использования сталефибробетона необходима методика расчета его трещиностойкости при различных вариантах действия нагрузки и конструктивных особенностях.

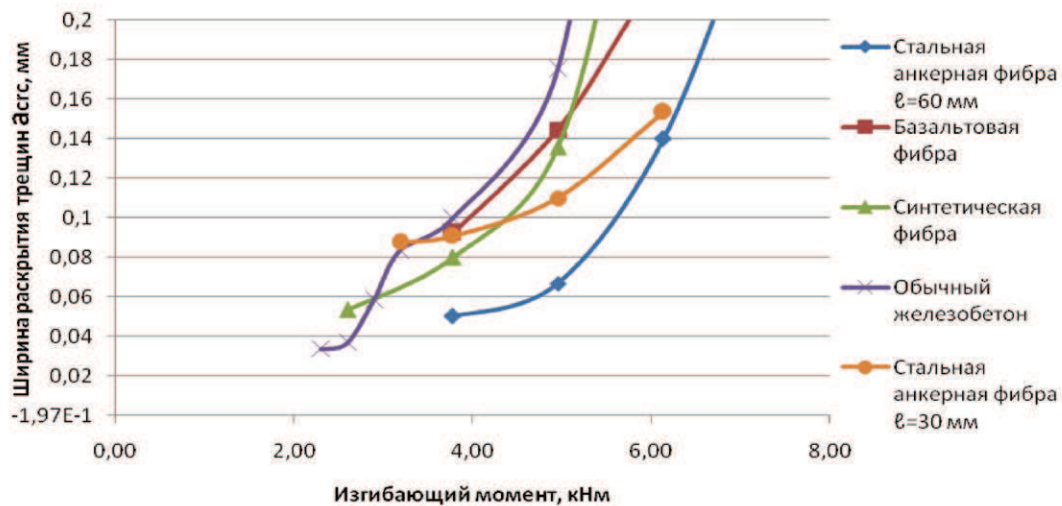


Рис. 1. Экспериментальная зависимость ширины раскрытия трещин от изгибающего момента для различных типов фибры

В настоящее время известна методика НИИЖБ, приведенная в СП 52-104-2006* [2] для расчета ширины раскрытия трещин в фибробетоне с различными типами фибры. В соответствии с ней ширина раскрытия трещины определяется по формуле

$$a_{cr} = \delta \varphi_1 \eta_{f1} \eta_{red} (\sigma_f / E_f) 20(3,5 - 100\mu_{red}) \sqrt[3]{d_{red}}, \quad (1)$$

где δ — коэффициент, учитывающий характер действия внешней нагрузки;
 φ_1 — коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки;
 η_{f1} — коэффициент, учитывающий влияние фибрового армирования:

$$\eta_{f1} = \frac{0,5}{0,5 + m}, \quad (2)$$

где

$$m = \left[\frac{40d_{f,red}^2 (\mu_{fa} + 5\mu_s)}{\mu_{fa}^2 A} + 1 \right]^{-1}, \quad (3)$$

здесь A — площадь поперечного сечения элемента, трещиностойкость которого проверяется;
 $d_{f,red}$ — приведенный диаметр используемой фибры:

$$d_{f,red} = 1,13 \sqrt{S_f}, \quad (4)$$

здесь S_f — площадь номинального поперечного сечения фибры; μ_{fa} — коэффициент приведенного армирования по площади:

$$\mu_{fa} = \mu_{fv} k_{or}^2, \quad (5)$$

здесь μ_{fv} — коэффициент фибрового армирования по объему;

k_{or} — коэффициент, принимаемый по табл. 6.1 [2];

η_s — коэффициент, учитывающий характеристики стержневой арматуры;

η_{red} — приведенный коэффициент армирования:

$$\eta_{red} = \frac{\eta_{f2} \mu_{fa} + \eta_s \mu_s}{\mu_{fa} + \mu_s}, \quad (6)$$

здесь η_{f2} — коэффициент, принимаемый в зависимости от типа фибры; σ_f — условное напряжение в крайнем растянутом волокне:

$$\sigma_f = \frac{M}{W_{f1}}, \quad (7)$$

здесь W_{f1} — момент сопротивления, приведенного к стальному сечению;
 E_f — модуль упругости стальной фибровой арматуры;
 μ_{red} — приведенный коэффициент армирования по площади сечения:

$$\mu_{red} = \mu_{fa} + \mu_s, \quad (8)$$

здесь d_{red} — приведенный диаметр фибровой и стержневой арматуры:

$$d_{red} = \frac{d_{f, red}^2 \mu_{fa} + d_s^2 \mu_s}{d_{f, red} \mu_{fa} + d_s \mu_s}. \quad (9)$$

В основе методики [2] лежат положения СНиП 2.03.01-84 [4] и СНиП 2.03.03-85 [5], основанные на эмпирических данных и исследованиях Ф. Н. Рабиновича, проведенных в ЦНИИПромзданий.

На рис. 2 приведен график зависимости ширины раскрытия трещин от действующих напряжений, полученный расчетом и экспериментальная кривая. Кроме того, учитывается, что коэффициент влияния фибрового армирования μ_{f1} может быть определен по методике СП 52-104-2006* [2] и по методике, предложенной Ф. Н. Рабиновичем [3].

На рис. 2 представлены зависимости, соответствующие методикам [3] и [2].

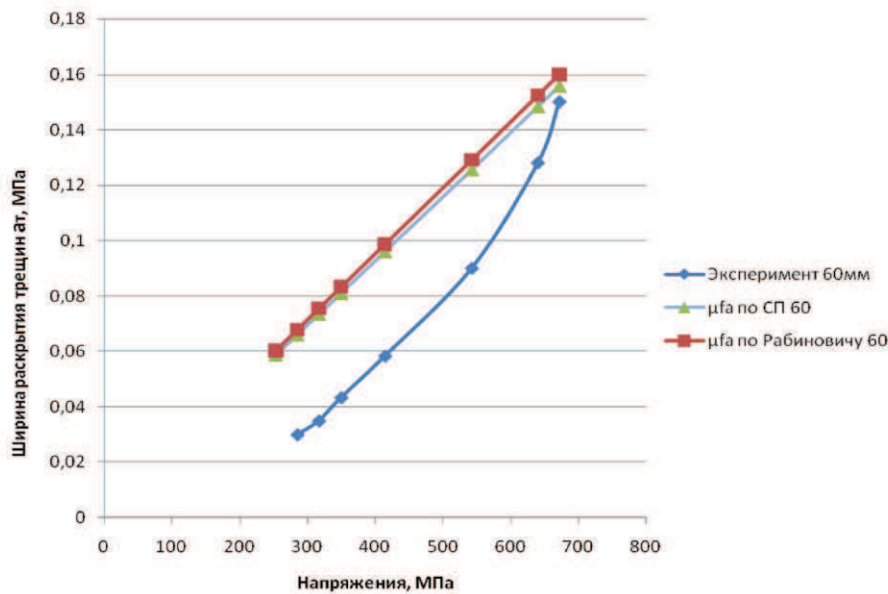


Рис. 2. Экспериментальная и теоретическая зависимости ширины раскрытия трещин от действующих напряжений в крайнем растянутом волокне

Из графика видно, что ширина раскрытия трещин, полученная при расчете μ_{f1} по методике [2], более близка к экспериментальным данным, однако ее разница со значениями, полученными по методике [3], незначительна. Также стоит отметить, что формула расчета μ_{fa} в [3] выглядит более обоснованной с точки зрения характера работы композита, так как учитывает влияние механизма анкеровки фибры в бетонной матрице. Однако дальнейший анализ и расчет выполнялся по методике [2], так как предлагаемая в ней формула расчета μ_{fa} удобнее в использовании.

Из приведенного на рис. 2 графика видно, что при значениях действующих напряжений до 670 МПа, соответствующих изгибающему моменту 6,13 кНм, теоретические значения превосходят действительные почти в 2 раза. Отмеченное расхождение результатов есть следствие несовершенства методики [2] в части учета особенностей механизма раскрытия трещин в судокорпусных конструкциях с комбинированным армированием. Эти конструкции являются тонкостенными по

сравнению с железобетонными конструкциями, используемыми в гражданском строительстве, что оказывает существенное влияние на характер распределения фибры и структуру бетона. Кроме того, методика [2] не включает возможность анализа трещиностойкости композита со стальной анкерной фиброй длиной 60 мм. Для уточнения характера изменения значений ширины раскрытия трещин процесс трещинообразования предлагается рассматривать состоящим из трех стадий работы композита (рис. 3). Такой подход более точно отражает реальную физическую картину трещинообразования в сечении с комбинированным армированием.

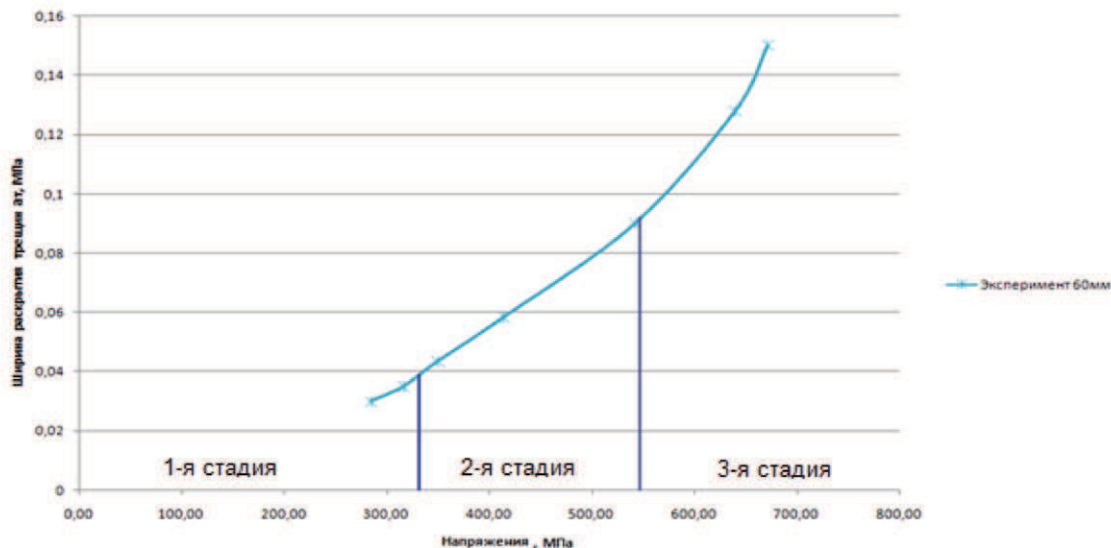


Рис. 3. Стадии работы сталефибробетонного композита

Первая стадия работы композита характеризуется появлением первых трещин и началом активного трещинообразования на растянутой бетонной поверхности. Растягивающие усилия в сечении превосходят прочность матричного бетона на растяжение. Начинают развиваться пластические деформации. Фибры надежно заанкерены в бетоне матрицы, и потеря сцепления на границе контакта бетона и металла фибр не происходит. Данная стадия работы композита является упругоупругой. При дальнейшем увеличении нагрузки завершается процесс образования трещин на бетонной поверхности, новые трещины не образуются и композит переходит во вторую стадию работы — пластическую.

На второй стадии работы происходит активное увеличение ширины раскрытия образовавшихся трещин в композите. Растягивающие усилия активно воспринимаются фибрами, пересекающими впадины трещин. В зоне трещин усилия воспринимаются фибробетонным композитом и арматурными стержнями. Начало второй стадии работы композита характеризуется наступлением момента начала потери сцепления в контактной зоне поверхности фибры и окружающей ее бетонной матрице. Действующие на поверхности фибр касательные напряжения превосходят напряжения сцепления в контактной зоне $R_{\text{сц}}$ и начинается процесс выдергивания фибры из бетона. Величина $R_{\text{сц}}$, определенная на основе эмпирических данных [3], соответствует

$$R_{\text{сц}} = R_b / 8, \quad (10)$$

где R_b — сопротивление бетона матрицы сжатию.

С другой стороны, сила сцепления создает касательные напряжения, возникающие в контактной зоне при выдергивании фибр из матрицы, и определяется как

$$R_{\text{сц}} = \frac{N_f}{A_f}, \quad (11)$$

где N_f — осевое выдергивающее усилие, действующее на крайние растянутые фибры, пересекающие расчетное сечение под прямым углом; A_f — площадь поверхности анкеровки единичной фибры с бетоном матрицы.

Зная силу сцепления с бетоном $R_{\text{сц}}$ и площадь поверхности контакта фибр A_f , действующее осевое усилия в крайнем растянутом волокне выразится из формулы (11):

$$N_f = R_{\text{сц}} A_f.$$

Нормальные растягивающие напряжения в крайних растянутых волокнах определяются по формуле

$$\sigma_f = \frac{N_f}{S_f},$$

где S_f — площадь поперечного сечения фибры.

В нашем случае при $R_b = 22$ МПа, $A_f = 94,2$ мм² и $S_f = 3,14$ мм² вторая стадия работы композита наступает при нормальных растягивающих напряжениях $\sigma_f = 330$ МПа.

Третья стадия работы композита характеризуется достижением предельного состояния прочности сталефибробетонного сечения на растяжение при изгибе. Дальнейшее развитие трещин происходит вследствие выдергивания и частичного разрыва фибры последовательно по высоте сечения. При дальнейшем увеличении внешней нагрузки происходит образование сквозных трещин и наступает разрушение конструкции. Данная стадия характеризуется пластическим характером работы композита.

На представленной выше диаграмме экспериментальных значений ширины раскрытия трещин третья стадия работы композита наступает при напряжениях в крайних растянутых волокнах сечения порядка 540 МПа, при которых происходит изменение кривизны кривой на графике и существенное ускорение развития трещин, вплоть до разрушения конструкции. Данная точка изменения характера роста диаграммы характеризуется процессом интенсивного выдергивания фибры из тела бетона-матрицы. Происходит это из-за того, что анкеровка фибры в бетоне-матрице класса В30 недостаточна и сопротивление растяжению сталефибробетона будет исчерпываться из-за выдергивания условно всех фибр из бетона. В реальных же условиях механизм выдергивания фибры из бетонной матрицы довольно сложный, и строго описать характер взаимодействия заанкеренной фибры в матрице в настоящее время довольно проблематично из-за отсутствия серьезных исследований этого процесса, что является следствием технических трудностей проведения эксперимента. Известно, что выдергивание фибры из матрицы сопровождается смятием бетона, окружающего анкерный крючок фибры, и одновременным распрямлением загибов данного крючка. На основе обработки опытных данных было установлено, что сопротивление смятию в данном случае составило $R_{\text{см}} = R_b/5$, соответствующему сопротивлению фибробетона на растяжение при изгибе, хотя по данным [3] оно составляет $R_{\text{см}} = 2,5R_b$, что, по нашему мнению, является сильно завышенным и в очередной раз говорит о необходимости проведения дальнейших детальных исследований в этом направлении.

Исходя из приведенного выше анализа стадий работы композита с точки зрения трещинообразования, во-первых, следует учесть особенность работы фибры в судовых конструкциях (плитах). Высота их поперечного сечения небольшая, что создает предпосылки для более благоприятной ориентации фибр в плоскости плиты и повышает насыщенность сечения композита стержневой арматурой. Это в конечном итоге приводит к уменьшению коэффициента η_{f1} , учитывающего влияние фибрового армирования. Последний в соответствии с методикой [2] определяется по формуле (2).

Значения входящего в нее параметра m , исходя из анализа полученных экспериментальных данных и стадии работы композита, предлагается определять по следующим выражениям:

$$\text{если } 0 < \sigma_f \leq 330 \text{ МПа, } m = \left[\frac{d_{f, \text{red}}^2 (\mu_{fa} + \mu_s)}{\mu_{fa}^2 A} + 0,8 \right]^{-1};$$

$$\text{если } 330 < \sigma_f \leq 540 \text{ МПа, } m = \left[\frac{20d_{f, \text{red}}^2 (\mu_{fa} + 2\mu_s)}{\mu_{fa}^2 A} + 1 \right]^{-1};$$

$$\text{если } 540 < \sigma_f \text{ МПа, } m = \left[\frac{20d_{f, \text{red}}^2 (\mu_{fa} + 2\mu_s)}{\mu_{fa}^2 A} + 1 \right]^{-1}.$$

Кроме того, учитывая отмеченные выше особенности работы анкерной стальной фибры в судовых конструкциях на разных стадиях трещинообразования, что влияет на напряжения в крайнем растянутом волокне изгибаемой композитной плиты, предлагается корректировать его величину введением следующих коэффициентов:

$$\text{если } 0 < \sigma_f \leq 330 \text{ МПа, } K_\sigma = (0,0014\sigma_f + 0,22);$$

$$\text{если } 330 < \sigma_f \leq 540 \text{ МПа, } K_\sigma = (0,0015\sigma_f + 0,22);$$

$$\text{если } 540 < \sigma_f \leq 540 \text{ МПа, } K_\sigma = (0,0022\sigma_f - 0,15).$$

Для проверки сходимости значений, полученных по предлагаемой методике, отличающейся от [2] введением коэффициента K_σ и способом расчета параметра m , с экспериментальными данными выполнен расчет ширины раскрытия трещин для опытных образцов-плит. Результаты расчета представлены на рис. 4.

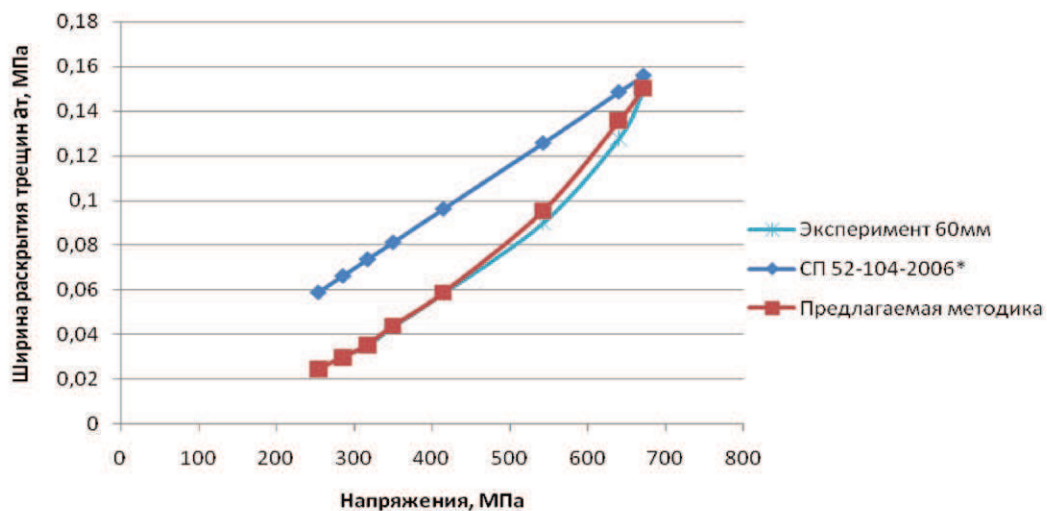


Рис. 4. Ширина раскрытия трещин в плите опытного образца

Как видно из рис. 4, разработанная методика расчета ширины раскрытия трещин имеет достаточно хорошую сходимость с экспериментальными данными и более точно учитывает характер работы сталефибробетонной корпусной конструкции, армированной стальной анкерной фиброй длиной 60 мм типа HENDIX, при восприятии изгибающего момента.

Список литературы

1. Горохов М. С. Влияние параметров дисперсного армирования на трещиностойкость судовых конструкций из фибробетона / М. С. Горохов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — Вып. 1 (23). — С. 68–73.

2. СП 52-104-2006*. Сталефибробетонные конструкции. — М.: НИИЖБ: ОАО «НИЦ «Строительство», 2010. — 68 с.
3. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории проектирования, технологии, конструкции / Ф. Н. Рабинович. — М.: Изд-во АСВ, 2004. — 560 с.
4. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. — М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1989. — 80 с.
5. СНиП 2.03.03-85*. Армоцементные конструкции. — М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1986. — 51 с.

УДК 621.785; 621.791; 621.762

В. А. Коротков,
д-р техн. наук, профессор,
Нижнетагильский филиал
Уральского федерального университета

ТЕХНОЛОГИЯ РУЧНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ

TECHNOLOGY MANUAL PLASMA HARDENING

Разработанная в 2002 г. установка УДГЗ-200 позволяет вручную закаливать то, что ранее закалке не подвергалось, быстро изнашивалось и становилось причиной частых и дорогостоящих ремонтов. Ухудшение шероховатости поверхности и искажение размеров при закалке столь незначительные, что многие детали после нее не нуждаются в финишной механообработке, а сразу направляются в эксплуатацию, что снижает продолжительность и себестоимость их производства. Слой плазменной закалки многократно превосходит в износостойкости металл в нормализованном или состоянии объемной закалки с отпуском, что делает применение плазменной закалки высокоэффективным. Плазменная закалка установкой УДГЗ-200 производится без подачи воды на деталь, что позволяет выполнять ее не только в специализированных термических цехах, но также по месту обработки и эксплуатации деталей. Это в совокупности с тем, что закалку установкой УДГЗ-200 осваивают сварщики 2–3-го разрядов, упрощает внедрение ее в производство.

Developed in 2002, setting UDGZ-200 allows you to manually temper what had previously not been subject to hardening, wear out quickly and cause frequent and costly repairs. Deterioration of surface roughness and dimensional distortion during hardening so minor that many of the items after her do not need finish machining, and immediately sent to the operation, which reduces the duration and cost of production. Layer of plasma hardening surpasses in wear metal in the normalized condition or bulk quenched and tempered, which makes use of a highly effective plasma hardening. Plasma hardening installation UDGZ-200 is produced without the water supply is not the item that allows her not only in specialized thermal shops, but also at the place of processing and operation details. This coupled with the fact that the hardening installation UDGZ-200 master welder 2-3 discharges facilitates its introduction into production.

Ключевые слова: плазменная поверхностная закалка, износостойкость.

Key words: plasma surface hardening, wear resistance.

Введение

В современный век роботов и «безлюдных» производств разработка ручной технологии может показаться ошибочной. Однако ручные технологии благодаря универсальности демонстрируют живучесть. В мире основной объем сварки (более 80 %) продолжает выполняться электродами или полуавтоматами, то есть вручную. По аналогии полагали (этот расчет оправдался), что с разработкой ручного способа поверхностной закалки объемы ее применения возрастут и произойдет