

только одно собственное число  $\lambda_1 = 0$  и поэтому на основании (2.16) и (2.17) осадка кольцевого штампа, нагруженного равномерно распределенной нагрузкой  $q$  получается в таком виде

$$w_1 = A_1 = \frac{qa(1-\nu_0^2)}{E_0} \left( \frac{b^2}{a^2} - 1 \right) \frac{\omega e^{\frac{1}{2\omega}}}{\sum_{n=0}^{\infty} \alpha_{n+1,1} I_n \left( \frac{1}{2\omega} \right)} \quad (2.18)$$

3. Численные результаты приведем для кольцевой пластинки с данными

$$a = 0.5b; \nu_p = 1/6; \frac{E_0 b^3}{2\pi(1-\nu_0^2)D} = 5,$$

лежащей на упругом слое конечной толщины  $h = b$ , шарнирно сцепленным с жестким основанием. В этом случае [8] для (2.4) на основании асимптотических свойств представим

$$L(u) - 1 = e^{-2u} \sum_{k=0}^{\infty} b_k u^k,$$

$$b_0 = -1; b_1 = -1.5; b_2 = -1; b_3 = -1/3;$$

$$b_4 = 0; b_5 = 1/18; b_6 = 1/45; \dots$$

что позволяет представить

$$\int_0^{2\pi\omega} \int_0^{\omega} [L(u) - 1] J_0 \left( \frac{u}{h} \sqrt{r^2 - 2r\rho \cos\theta + \rho^2} \right) d\theta du = 2\pi \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} b_k \frac{(k+2m)!}{2^{k+1} (m!)^2} \left( 1 - \frac{\rho^2}{r^2} \right)^m P_m \left( \frac{\rho^2 + r^2}{\rho^2 - r^2} \right) \left( -\frac{r^2}{16h^2} \right)^m$$

где  $P_m(z)$  - полином Лежандра [7].

В процессе вычислений на ПЭВМ получено для 5 членов разложения (1.2) и 10 членов разложения (2.10)

$i$	$\lambda_i$	$\gamma_{11}$	$\gamma_{21}$	$\gamma_{31}$
2	3.087622938	0.31181586	-0.08516220	1.368944030
3	9.626189261	0.27064160	-0.00010407	-49.433663
4	15.80578056	0.14282070	-0.000000204	1124.023747
5	22.06005009	0.10122185	0.0	-26180648

УДК 621.791

Вагин В.В.

## КОНТРОЛЬ НАРУШЕНИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ МАГНИТНЫМИ МЕТОДАМИ

На основе исследований магнитных характеристик теплоустойчивой стали 12Х1МФ в зонах сплавления и термического влияния при различных режимах электродуговой сварки предложен новый подход для оценки качества и прогнозирования долговечности эксплуатации сварных соединений паропроводов на основе магнитной структуроскопии.

Из теплоустойчивых сталей перлитного класса наиболее

$$[E] = \begin{bmatrix} 1.53789 & 0.06073 & 0.03001 & 0.00693... \\ 0.06073 & 0.09241 & 0.01058 & 0.00235... \\ 0.03001 & 0.01058 & 0.04208 & 0.00195... \\ 0.00693 & 0.00235 & 0.00195 & 0.03710... \end{bmatrix}$$

$$\frac{D}{qb^4} [A]^T = \begin{bmatrix} 0.03335 & -0.00603 & 0.00101 & 0.00038 & 0.00002 \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{q} [B]^T = \begin{bmatrix} 0.10695 & 0.09211 & 0.00242 & -0.00837 & -0.00314 & -0.00007 & 0.00010 \end{bmatrix}$$

Контролем правильности и точности полученных результатов будет проверка уравнения равновесия, которая в нашем случае дает

$$\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^b p(r) r dr = 2\pi a^2 \frac{e^{2\omega}}{\omega} \sum_{m=0}^{10} B_m I_m \left( \frac{1}{2\omega} \right) = 0.75 qb^2$$

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Развитие теории контактных задач в СССР. Под. ред. Л.А. Галина. М.: Наука. - 1976. - С. 493.
2. Ректорис К. Вариационные принципы в математической физике и технике. М.: Мир. - 1985. - С. 589.
3. Цейтлин А.И. Прикладные методы решения краевых задач строительной механики. М.: Стройиздат. - 1984. - С. 334.
4. Фаддеева В.Н. О фундаментальных функциях оператора  $X^{IV}$ . Труды математического института АН СССР. Т.2861949. - С.157-159.
5. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. М.: Стройиздат. - 1984. - С. 679.
6. Босаков С.В. Вариационный подход к решению контактной задачи для упругой полуплоскости. ПМ, т.30. - N7. - 1994. - С. 70-73.
7. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: ФМ. - 1963. - С. 1097.
8. Ворович И.М., Александров В.М., Бабешко В.А. Неклассические смешанные задачи теории упругости. М.: Наука. - 1974. - С. 455.
9. Александров В.М. Осесимметричная задача о действии кольцевого штампа на упругое полупространство. МТТ. - 1967. - С.108-116.
10. Абрамович М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука. - 1979. - С. 830.

Вагин Валерий Васильевич. Аспирант Могилевского государственного технического университета. Беларусь, МГТУ, 212005, г. Могилев, ул. Ленина 70.

ловой усталости. Сварка таких сталей затруднена, являясь при этом основным технологическим процессом при изготовлении и монтаже энергооборудования. От качества сварных соединений зависит надежность и безопасность энергетического оборудования во время эксплуатации. Технология сварки теплоустойчивых сталей включает в себя три операции: предварительный подогрев кромок, сварка, термообработка. Режимы этих операций должны выбираться тщательно и выдерживаться строго. Грубые нарушения технологии приводят к образованию дефектов в сварном шве или околошовной зоне. Эти дефекты обнаруживаются при дефектоскопии сварных соединений и исправляются. Не меньшую опасность представляют собой нарушения, не приводящие к образованию дефектов, но вызывающие образование в зоне шва неблагоприятной структуры и фазового состава. Такие швы обладают повышенной склонностью к замедленному разрушению и имеют пониженный ресурс работы. При эксплуатации под действием рабочих нагрузок и высоких температур происходит постепенное накопление повреждений до критического значения и разрушение сварного шва. Главным способом борьбы с образованием трещин является регулирование структурных изменений путем выбора рациональных режимов сварки, снижающих скорость охлаждения шва и околошовной зоны, т.е. путем предварительного и сопутствующего нагрева и термической обработки конструкций после сварки.

По внешнему виду и результатам дефектоскопии сварные соединения с поврежденной структурой в околошовной зоне, вызванной нарушением термического цикла сварки, ничем не отличаются от качественных и в настоящее время беспрепятственно попадают в эксплуатацию. Выявление этих повреждений весьма важно для прогнозирования ресурса работы сварного соединения. Неразрушающие методы контроля, позволяющие обнаружить такие швы, в настоящее время отсутствуют.

Предлагается новый подход по выявлению нарушений технологии сварки теплоустойчивых сталей, который заключается в измерении коэрцитивной силы (поля остаточной намагниченности) металла в зоне сварного соединения.

На рисунке 1 представлены результаты измерений коэрцитивной силы  $H_c$  подготовленных образцов по разработанной методике.

Полученные результаты распределения коэрцитивной силы  $H_c$  показывают, что при нарушении технологии сварки в околошовной зоне наблюдается резкое изменение коэрцитивной силы. При переходе от участка перегрева к "белой полосе"  $H_c$  уменьшается примерно в 3 раза (кривая 1), что связано с существенными изменениями в структуре этих участков. Для соединения, сваренного с соблюдением технологии,  $H_c$  не имеет резких колебаний и практически стабильна. Результаты экспериментов свидетельствуют о возможности использования коэрцитивной силы для обнаружения нарушений технологии сварки, приводящих к замедленному разрушению сварной конструкции.

Далее для образцов, на которых исследовалась твердость были проведены измерения поля остаточной намагниченности. Измерения проводились в зоне шва, зоне перегрева, зоне разупрочнения "белой полосы" и в основном металле. По результатам измерений была построена зависимость коэрцитивной силы от твердости металла  $\Delta H = f(HB)$ , которая приведена на рисунке 2.

Эта зависимость имеет линейный характер с достаточно высоким коэффициентом корреляции  $r=0,85$ . На графике показаны зоны неблагоприятных значений твердости  $HB < 120$  и  $HB > 300$ , по которым можно определить граничные значения

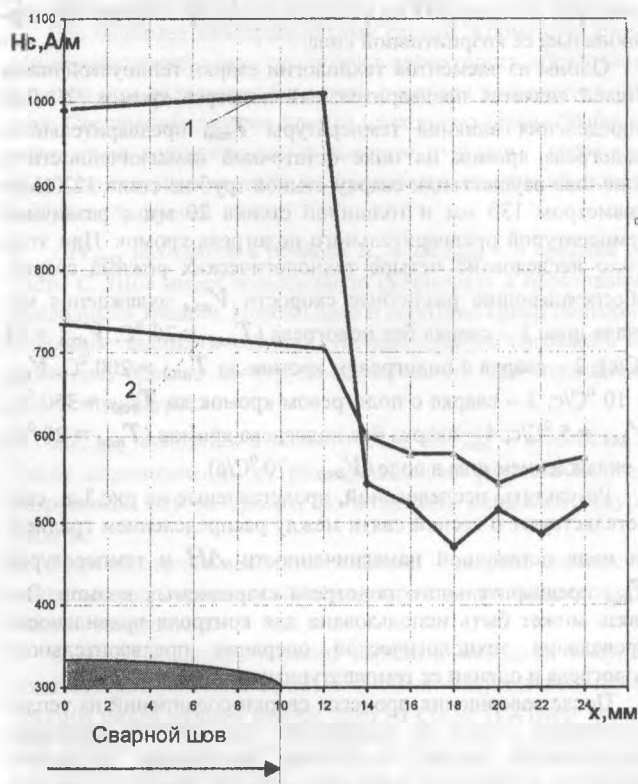


Рисунок 1. Распределения коэрцитивной силы  $H_c$  в зоне сварного соединения стали 12Х1МФ. 1 – сварка с нарушением технологии; 2 – сварка без нарушения технологии

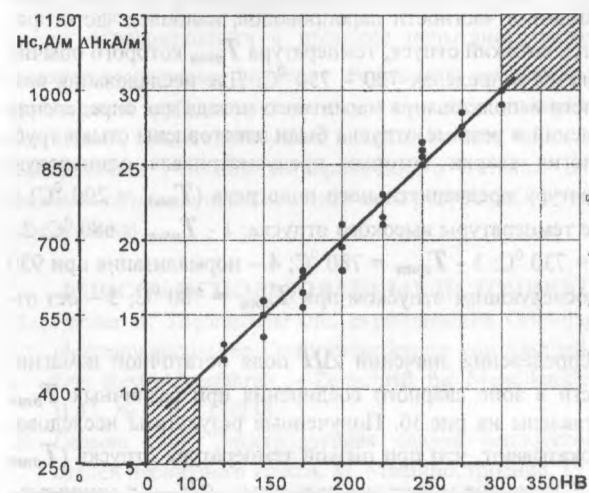


Рисунок 2. Зависимость коэрцитивной силы (поля остаточной намагниченности) от твердости металла

$\Delta H$  для оценки склонности сварного соединения из теплоустойчивой стали к замедленному разрушению.

Однако, в рассматриваемом случае ширина интересующих нас участков перегрева и "белой полосы" не превышает 2 – 4 мм. Поэтому в основу измерения параметра, пропорционального коэрцитивной силе контролируемого участка металла, был положен метод «точечного полюса», предложенный Ф.Ферстером [1]. Метод заключается в намагничивании контролируемого участка изделия путем контакта с полюсом постоянного магнита до состояния, близкого к магнитному насыщению, и последующем измерении остаточной намагни-

ченности изделия  $\Delta H$  над местом контакта, которая пропорциональна ее коэрцитивной силе.

Одним из элементов технологии сварки теплоустойчивых сталей является предварительный подогрев кромок [2]. Для определения влияния температуры  $T_{под}$  предварительного подогрева кромок на поле остаточной намагниченности в зоне шва осуществили сварку стыков труб из стали 12Х1МФ диаметром 130 мм и толщиной стенки 20 мм с различной температурой предварительного подогрева кромок. При этом было исследовано четыре технологических режима сварки, обеспечивающие различные скорости  $V_{охл}$  охлаждения металла шва: 1 – сварка без подогрева ( $T_{под} = 20^\circ\text{C}$ ,  $V_{охл} = 25^\circ\text{C}/\text{c}$ ); 2 – сварка с подогревом кромок до  $T_{под} = 200^\circ\text{C}$ ,  $V_{охл} = 10^\circ\text{C}/\text{c}$ ; 3 – сварка с подогревом кромок до  $T_{под} = 350^\circ\text{C}$ ,  $V_{охл} = 5^\circ\text{C}/\text{c}$ ; 4 – сварка без подогрева кромок ( $T_{под} = 20^\circ\text{C}$ ) с охлаждением шва в воде ( $V_{охл} = 70^\circ\text{C}/\text{c}$ ).

Результаты исследований, представленные на рис.3а, свидетельствуют о тесной связи между распределением градиента поля остаточной намагниченности  $\Delta H$  и температурой  $T_{под}$  предварительного подогрева свариваемых кромок. Эта связь может быть использована для контроля правильности проведения технологической операции предварительного подогрева и оценки ее температурных параметров.

После завершения процесса сварки соединений из теплоустойчивых сталей их подвергают термической обработке, позволяющей снизить остаточные напряжения, выровнять структуру и повысить работоспособность. Выбор различных вариантов термообработки (высокий отпуск, нормализация, отход) осуществляется с учетом ответственности конструкции, ее размеров и толщины металла, экономических соображений [3]. Для энергетического оборудования тепловых электростанций, в частности паропроводов, наиболее часто применяется высокий отпуск, температура  $T_{отп}$  которого обычно выбирается в пределах  $720 - 750^\circ\text{C}$ . Для исследования возможности использования магнитного метода для определения отклонений в режиме отпуска были изготовлены стыки труб, технология сварки которых предусматривала одинаковую температуру предварительного подогрева ( $T_{под} = 200^\circ\text{C}$ ) и разные температуры высокого отпуска: 1 -  $T_{отп} = 680^\circ\text{C}$ ; 2 -  $T_{отп} = 730^\circ\text{C}$ ; 3 -  $T_{отп} = 780^\circ\text{C}$ ; 4 – нормализация при  $930^\circ\text{C}$  с последующим отпуском при  $T_{отп} = 780^\circ\text{C}$ ; 5 – без отпуска.

Распределения значений  $\Delta H$  поля остаточной намагниченности в зоне сварного соединения при различных  $T_{отп}$  представлены на рис.3б. Полученные результаты исследований показывают, что при низкой температуре отпуска ( $T_{отп} = 780^\circ\text{C}$ ) разница между максимальным  $\Delta H_{max}$  и минимальным  $\Delta H_{min}$  превышает  $10000 \text{ A}/\text{m}^2$ . При повышении  $T_{отп}$  до  $730^\circ\text{C}$  просходит выравнивание распределения  $\Delta H$  вдоль линии измерения. При соблюдении технологического цикла сварки достигается равномерное распределение  $\Delta H$  без резких изменений вдоль линии измерения. При выравнивании механических свойств околошовной зоны путем отпуска при  $T_{отп} = 780^\circ\text{C}$  возможен переход нижней критической границы твердости  $HВ < 120$  ( $\Delta H < 11000 \text{ A}/\text{m}^2$  в соответствии с рис.3б). Наилучшие результаты по однородности свойств металла околошовной зоны дает нормализация с последующим отпуском (кривая 4 на рис. 3б).

Таким образом, проведенные исследования показывают наличие корреляции между режимом высокого отпуска и значением поля остаточной намагниченности в зоне сварного

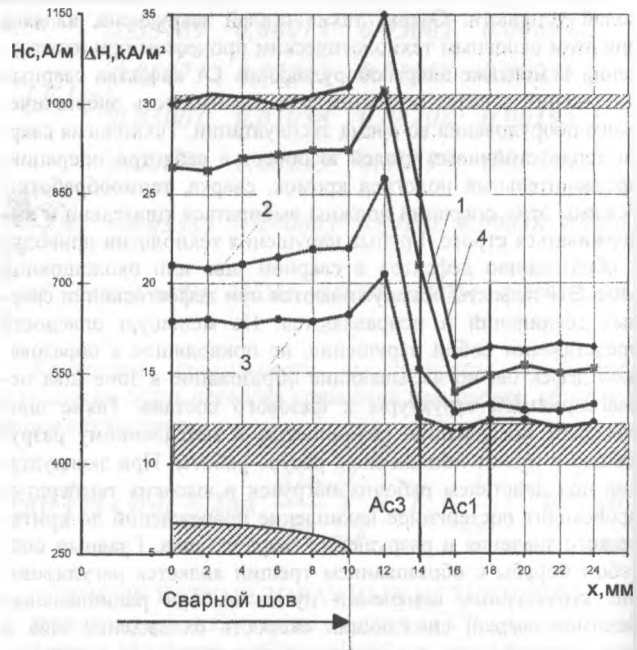


Рисунок 3а. Распределение коэрцитивной силы в зоне соединения, сваренного при различной температуре предварительного подогрева:

1 -  $T_{под}=20^\circ\text{C}$ ; 2 -  $T_{под}=200^\circ\text{C}$ ; 3 -  $T_{под}=350^\circ\text{C}$ ; 4 -  $T_{под}=20^\circ\text{C}$  (охлаждение в воде)

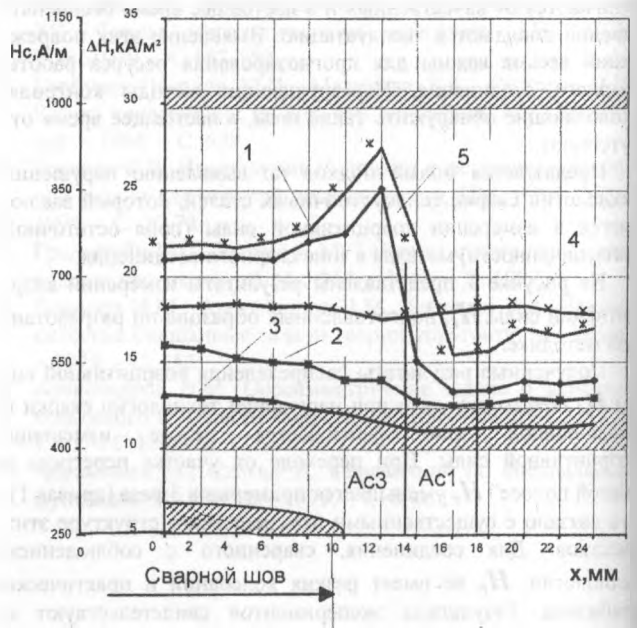


Рисунок 3б. Распределение коэрцитивной силы в зоне сварного соединения после высокого отпуска:

1 -  $T_{отп}=680^\circ\text{C}$ ; 2 -  $T_{отп}=730^\circ\text{C}$ ; 3 -  $T_{отп}=780^\circ\text{C}$ ; 4 - нормализация с последующим отпуском  $T_{отп}=780^\circ\text{C}$ ; 5 - при оптимальном подогреве без отпуска

шва. Это подтверждает правильность выбора магнитной характеристики для выявления нарушений технологии термообработки.

На основании результатов проведенных исследований разработана методика контроля соблюдения технологических условий термического цикла сварки по результатам измерения магнитных параметров околошовной зоны. Перед изме-

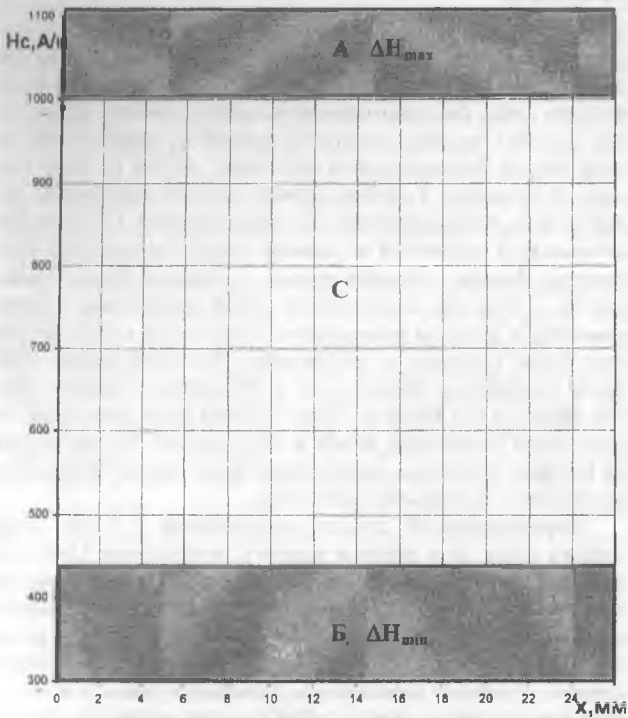


Рисунок 4. Схема оценки термического цикла сварки по результатам  $\Delta H$  измерений градиента поля остаточной намагниченности участков околошовной зоны после их намагничивания методом «точечного полюса»

рениями с участка сварного соединения длиной около 20 мм фрезированием или шлифовальной машиной снимают валик шва. В зоне сварного шва в направлении основного металла осуществляется пошаговое (с интервалом 1-2 мм) локальное измерение градиента поля остаточной намагниченности  $\Delta H$  металла после намагничивания по методу точечного полюса. Регистрируются максимальный  $\Delta H_{max}$  и минимальный  $\Delta H_{min}$ , значений градиента. На поле рис.3 нанесены верхняя (А) и нижняя (Б) браковочные области. Попадание  $\Delta H_{max}$  в область А свидетельствует о наличии в зоне перегрева закалочных структур и высокой склонности такого соединения к замедленному разрушению вследствие образования «холодных» трещин. Попадание  $\Delta H_{min}$  в область Б свидетельствует о разупрочнении металла на участке неполной перекристаллизации и пониженном ресурсе такого соединения при термоциклах сварки.

Всего возможно четыре варианта оценки соединения:

1.  $\Delta H_{max}$  находится в области А, а  $\Delta H_{min}$  – в области Б. Это наиболее неблагоприятный случай. Кроме описанных выше нарушений здесь существует вероятность образования отколов шва вследствие большого перепада твердости в зоне шва. Соединение должно пройти повторную термообработку, желательно нормализацию с высоким отпуском. Затем контроль повторяется и, если не произошло изменений показаний, шов бракуется.
2.  $\Delta H_{max}$  находится в области А, а  $\Delta H_{min}$  – в средней области С. Шов имеет повышенную склонность к образованию «холодных» трещин. Необходимо в короткие сроки повторить операцию высокого отпуска. Не допускается нагружать соединение, бросать конструкцию, оставлять при отрицательных температурах.
3.  $\Delta H_{max}$  находится в области С, а  $\Delta H_{min}$  – в области В. Такое соединение имеет разупрочненный участок. Быстрое разрушение ему не грозит, но возможно снижение ресурса работы.
4. Если обе точки находятся в зоне С – сварное соединение качественное, термический цикл сварки соответствует требованиям технологии.

С использованием первого варианта методики в производственных условиях произвели оценку параметров термического цикла ручной сварки труб из стали 12Х1МФ толщиной стенки 20 мм. Полученные результаты подтверждают результаты исследований. Были так же проведены измерения  $\Delta H$  на участках околошовной зоны соединений трубопроводов тепловых электростанций, разрушившихся в процессе испытаний или эксплуатации. Установлено, что значения  $\Delta H$  в окрестности «холодных» трещин продольного и кольцевого швов, образовавшихся в процессе испытаний, выходят за верхнее критическое значение. Результаты измерения  $\Delta H$  на фрагментах труб, разрушившихся в процессе длительной эксплуатации, свидетельствуют о наличии во всех таких сварных соединениях участков разупрочненного металла. Это дает возможность оценивать и остаточный ресурс работы сварного соединения.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Forster F. Theoretische und experimentelle Grundlagen der elektromagnetischen Qualitätssortierung von Stahlteilen. IV. Das Restfeldverfahren. - Zeitschrift für Metallkunde, 1954, V.45, № 4, P. 233-238.
2. Герман С.И. Электродуговая сварка теплоустойчивых сталей перлитного класса. М. Машиностроение. 1972. – С. 202.
3. Козлов Р.А. Сварка теплоустойчивых сталей М. Машиностроение. 1986. – С. 160.

УДК72.03(476)

Панченко Т.А.

**АРХИТЕКТУРА И ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСОВ БОГОЯВЛЕНСКОГО БРАТСКОГО МОНАСТЫРЯ И СПАССКОГО МОНАСТЫРЯ В МОГИЛЕВЕ**

В начале 17 в. Могилев являлся самым крупным ремесленно-торговым центром Беларуси. В конце 16в. в городе Панченко Татьяна Александровна. Ст. преподаватель каф. архитектурного проектирования и рисунка Брестского государственного технического университета. Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская 267.