

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ОТЖИГА В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛЬНОЙ СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ

Хребтов О. Е.

1. Введение

Выпуск стальной сварочной проволоки занимает 9–11 % от всего производства стали в Украине [1, 2]. Изготовление сварочной проволоки выполняется путем волочения стальной проволоки до необходимого диаметра на многократных волочильных станах с последующим омеднением полученной проволоки на финишных операциях производства [3].

Для обеспечения должного уровня качества в процессе выполнении технологического процесса изготовления проволоки, а именно – для предотвращения и уменьшения количества обрывов при волочении – применяется операция промежуточного отжига проволоки диаметров 2 мм и 2,5 мм. На данном переходе волочение стальной проволоки до необходимого диаметра перед омеднением из-за образовавшегося «наклепа» сопровождается частыми обрывами, следовательно, остановками работы станов. Актуальность проведенного исследования заключается в изучении применения дополнительной операции отжига для снижения вероятности обрыва. Данный отжиг позволит снять в металле все внутренние напряжения, образующиеся при предшествующем волочении, что позволит получить однородную мелкозернистую внутреннюю структуру проволоки.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объект исследования – использование электроконтактного отжига в процессе производства стальной сварочной проволоки.

Из теоретических исследований механических свойств электроотожженной стали известно, что твердость стали, отожженной электронагревом при соответствующих температурах, выше твердости стали, отожженной в печи [4]. К тому же при электроотпуске в определенном температурном интервале высокие прочностные характеристики стали сочетаются с ее удовлетворительной пластичностью [5]. Таким образом, электроотпущенная сталь представляет собой высокопрочный конструкционный материал с таким сочетанием прочности и пластичности, которые не могут быть достигнуты при отпуске в печи. Поэтому применение прямого электроконтактного нагрева (ЭН) вместо ранее используемого нагрева в печи позволяет избавиться от перечисленных недостатков.

При производстве сварочной проволоки электроконтактным отжигом, несмотря на все явные преимущества ЭН, его применение в процессе производства сварочной проволоки затруднительно. Это вызвано отсутствием подобного оборудования на украинском рынке и современных технологических решений по его реализации, в соответствии с реалиями условий производства [6].

Не определены требования к механическим параметрам проволоки после данного отжига, которые должны обеспечивать одновременно, стабильность процесса дальнейшего волочения с омеднением, и соответствие выдвигаемому ГОСТу к полученной продукции [7]. Без решения перечисленных вопросов, внедрение ЭН при производстве сварочной проволоки затруднительно.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – повышение качества стальной сварочной проволоки за счет применения электроконтактного отжига на специальном оборудовании.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

1. Разработать оптимальную схему расположения электроконтактных роликов относительно проволоки с возможностью их охлаждения.
2. Определить значения механических параметров стальной проволоки после электроконтактного отжига, удовлетворяющего одновременно стабильности процесса дальнейшего волочения с омеднением и соответствию выдвигаемому ГОСТом к полученной продукции.
3. Подтвердить необходимость использования системы автоматического регулирования температуры при электроконтактном отжиге.

4. Исследование существующих решений проблемы

Необходимо обеспечить параметры термической обработки выпускаемой продукции таким образом, что повысить качество и производительность стальной сварочной проволоки при минимальных затратах.

В результате анализа литературных данных [3–7] установлены способы выполнения технологических операций при непрерывнолитой и прокатанной проволоки разных материалов. Получены расчетно-экспериментальные зависимости влияния режимов волочения на конечные свойства проволоки. Также выполнен анализ влияния способа изготовления проволоки на физико-механические характеристики полученного материала [8–10].

Проведены исследования эффекта приложения напряжения 0–10 % и термообработки 300–600 °С в течение 2–30 минут проволоки NiTi в соляной ванне с последующей быстрой закалкой. При применении данной методики модуль упругости были в высшей степени непоследовательными, снижает качество выпускаемой продукции [11].

Применение термического отжига для повышения работоспособности объекта для конкретного технологического процесса, а именно восстановления конических поверхностей деталей электроконтактной наваркой проволокой, также рассматривалось в работе [12].

Авторами [13] показано, что улучшение микроструктуры и свойств проволоки из сплава Ag-4Pd после вытяжки и термообработки можно добиться управлением скорости вытягивания и температурой термообработки, то есть током плавления соединения сплава Ag-4Pd. Эти параметры также влияют на механические свойства и структуру сплава.

В работе [14] для проведения математического моделирования процесса электроконтактного отжига рассмотрены вопросы математического расчета распределение температурного поля в зависимости от источников тепла.

Таким образом, результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что для повышения качества выпускаемой продукции необходимо проводить исследования в области термической обработки проволоки при волочении, как на однократных, так и на многократных волочильных станах.

5. Методы исследования

Для решения поставленных задач была использована ранее спроектированная и реализованная экспериментальная установка отжига проволоки с системой автоматического контроля температуры в измеряемой точке [15]. Конструкционное расположение токопередающих контактных роликов данной установки показано на рис. 1. Нагрев для получения двух зон нагрева осуществляется с применением трёх роликов, при этом температуру нагрева распределяется на зоны. Это позволяет снизить напряжение в зоне нагрева проволоки. Разделение участка нагрева на две зоны позволяет разделить нагрев на диапазоны температуры. На первом участке до 180–250 °С (условие предварительного нагрева) и на втором до 500–600 °С (в пределах оптимального технологического режима) [16].

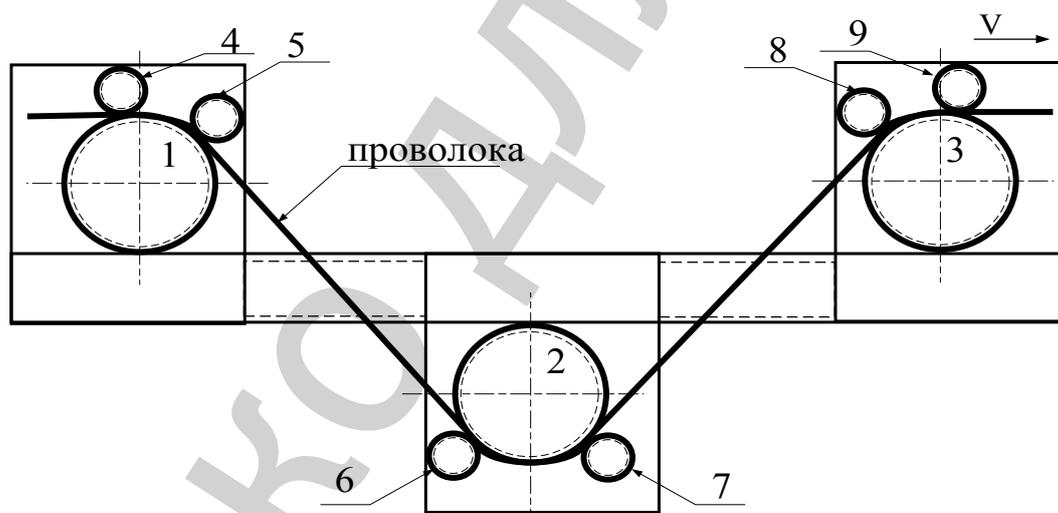


Рис. 1. Схема расположения электроконтактных роликов относительно проволоки: 1, 2, 3 ($\text{Ø}=170$ мм) – ролики являются токопроводящими; 4, 5, 6, 7, 8, 9 – ролики выполняют прижимную(направляющую) функцию

Дополнительным элементом, повышающем устойчивость работы механической части установки при прохождении через неё проволоки, являются фильеры установленные перед роликом 1, 2 (рис. 1). Данное техническое решение предотвращает возможность соскальзывания проволоки с пазов роликов 1, 2, 3 (рис. 1). Применения фильеры на входе установки приводит к выпрямлению поступающей проволоки, что положительно отображается на процессе отжига. Для предотвращения соскальзывания

проволоки предусмотрены специальные канавки, по которым «фиксируется» движение проволоки.

Для повышения износостойкости токопередающие ролики выполнены из: ролик 1, 3 – вольфрам-кобальт (ВК), ролик 2 – титан-никель (ТН). Использование роликов с данного сплава увеличивает время работоспособности технологической установки за счет высокой износостойкости. Помимо этого, была реализована возможность охлаждения роликов. Охлаждение выполнено с применением проходящей охлаждающей жидкости через специальные камеры сконструированные в блоке роликов. Циркуляция охлаждающей жидкости осуществляется с помощью применения насоса в системе охлаждения. Используемая установка электроконтактного отжига представлена на рис. 2.

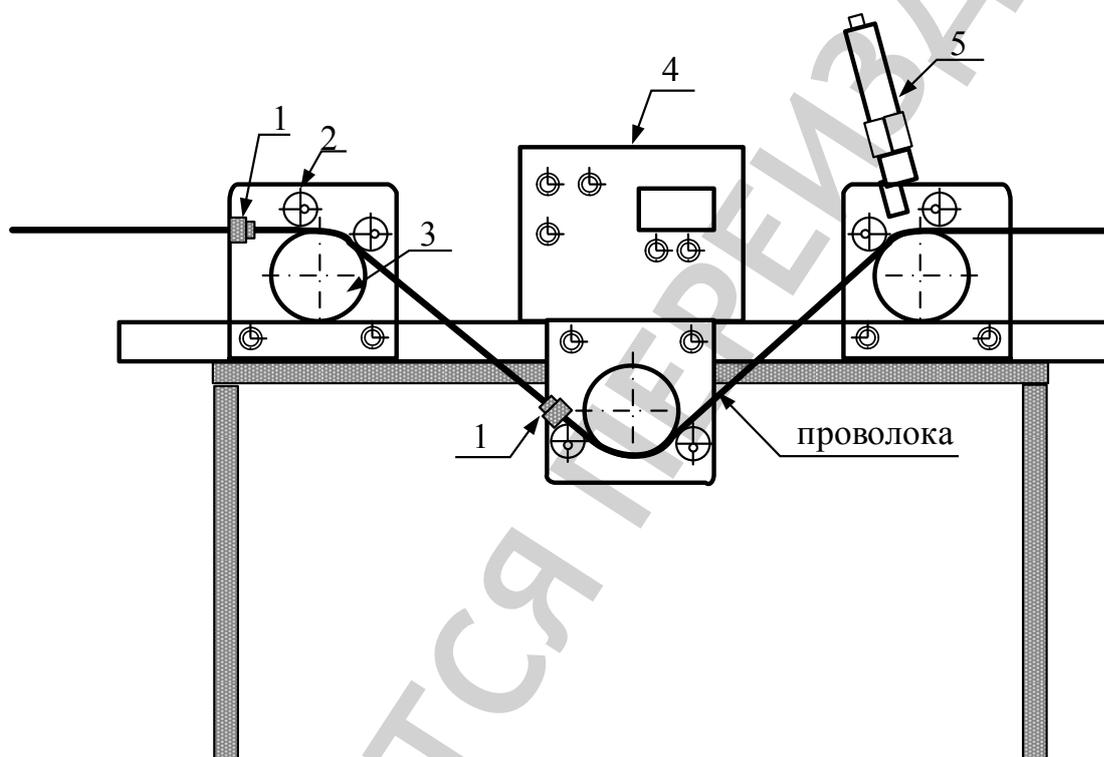


Рис. 2. Экспериментальная установка отжига: 1 – направляющая фильера; 2 – ролик прижимной; 3 – ролик контактный; 4 – шкаф управления; 5 – пирометр

В качестве источника тока используется трансформатор, который обеспечивает прохождение переменного тока, достаточного для температуры нагрева 500–650 °С при скорости отжига проволоки 1 м/с.

Для улучшения качества отожжённой проволоки, а именно, по показателю её физико-механических свойств по окончанию процесса отжига, установлена система автоматического регулирования (САР) температуры нагрева проволоки. Данная САР позволяет держать температуру на заданном значении, несмотря на изменение возмущающих воздействий [17].

Функциональная схема САР представлена на рис. 3.

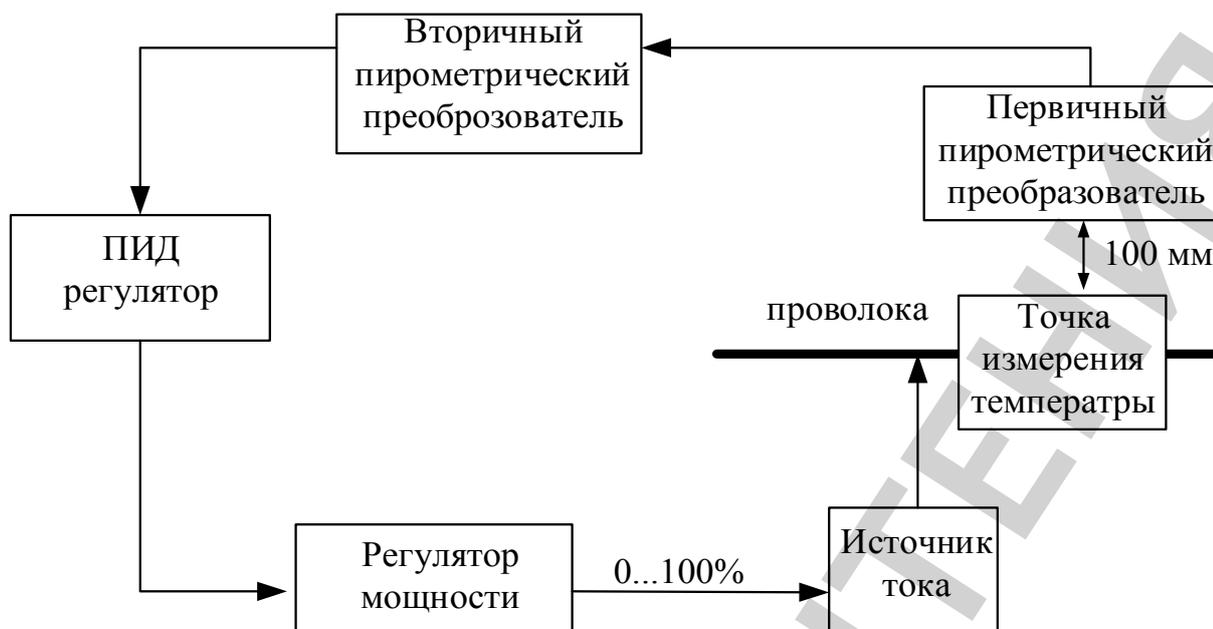


Рис. 3. Функциональная схема системы автоматического регулирования температуры при электроконтактном отжиге

На рис. 3 первичный пирометр контролирует температуру нагрева проволоки на контрольных точках в заданном диапазоне. При увеличении значения нагрева ПИД-регулятор формирует сигнал задания на регулятор мощности, которые в свою очередь формирует параметры источника питания. Данная операция имеет обратно пропорциональную зависимость. Применение при отжиге проволоки САУ с обратной связью по температуре и управляющему воздействию по току, дает возможность стабильной работы всей системы. Для избежания перегрева, а, следовательно, и обрыва проволоки, рекомендуется установить ограничения сигнала воздействия (ток) на таком уровне, чтобы обеспечить запас мощности для поддержания температурного режима, при этом предотвратить достижение температуры обрыва.

6. Результаты исследований

Проведены работы по исследованию режимов отжига на экспериментальной установке электроконтактного отжига и апробированию технологического процесса электроконтактного нагрева. В результате проведения исследовательских работ получены экспериментальные данные, анализ которых дал основания сделать выводы и разработать рекомендации относительно применении электроконтактного отжига при производстве стальной проволоки. Режимы проведенных экспериментальных отжигов стальной проволоки СВ08Г2С (диаметром 2,5 мм) и их результаты приведены в табл. 1.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие заключения. При увеличении скорости отжига свыше 1 м/с необходимо обратить внимание на использование более мощных электротехнических устройств и, как следствие, значительного повышения финансовых затрат для обеспечения стабильного технологического процесса электроконтактного отжига проволоки, а именно:

- увеличение мощности источника нагрева проволоки совместно с элементами коммутации и управления;
- усиление мощности системы охлаждения контактных роликов;
- изменение конструктивных параметров токопередающих механических составляющих.

Таблица 1

Механические характеристики отожжённой проволоки
(СВ08Г2С, диаметр 2,5 мм)

Номер образца	Скорость подачи, м/с	Температура нагрева, град °С	Предел прочности, Н/мм ²	Удлинение, %	Сужение, %
1	0,4	570	732,84	17,5	47
2	1	520	896,39	3	36
3	0,6	540	759,75	5,5	54
4	0,6	510	890,17	5,5	52
5	0,6	530	768,03	5	54
6	1,2	520	861,19	2,5	55
7	1,2	530	821,86	2,5	54

Особо следует отметить, что производительность процесса электроконтактного отжига при скорости работы в пределах 1 м/с составляет 136 кг/час. Значение затрачиваемой мощности при отжиге проволоки со скоростью в пределах 1 м/с, позволяющие получить границы температуры, характерные требуемым механическим свойствам отожжённой проволоки, соответствуют 15 кВт·час на 136,8 кг. То есть энергозатратность при данных условиях составляет 0,1 кВт·час/кг.

После проведения экспериментальных работ по определению зависимости механических характеристик от условий отжига, было принято решение провести отжиг проволоки в объёмах, достаточных для дальнейшего волочения с омеднением. Волочение с последующим омеднением для получения сварочной проволоки с конечным диаметром 1,6 мм и 1,2 мм выполнены на базе полученных отожжённых бухт образцов 3÷7 (табл. 1). В результате определения работоспособности полученных образцов сварочной проволоки обоих диаметров (табл. 2, 3) достигнуты следующие свойства: свариваемость и качество сварки хорошее, разбрызгиваемость минимальная, покрытие медью однородное. По свойствам и качеству сварки соответствует текущим показателям серийной производственной продукции.

Таблица 2

Механические характеристики омедненной проволоки диаметром 1,6 мм

Номер образца	Предел прочности, Н/мм ²	Удлинение, %
3	1119÷1158	3,5
4	1152 ÷1180	3,5

Таблица 3

Механические характеристики омедненной проволоки диаметром 1,2 мм

Номер образца	Предел прочности, Н/мм ²	Удлинение, %
5	1268÷1310	2,5÷3,0
6	1285÷1362	3,0÷5,0
7	1298÷1350	2,25÷3,0

Полученные образцы 3, 4 (табл. 2) и 5 (табл. 3) соответствуют требованиям по ГОСТу 2246-70, которые предъявляются к данной продукции.

Экспериментально установлено, что после отжига на диаметре 2,5 мм получены механические свойства проволоки в соответствии ГОСТу 2246-70. Также отсутствуют обрывы проволоки при следовании дальнейшему технологическому маршруту.

Применение системы автоматического управления температуры позволило достичь достаточной однородности проволоки, так как колебания временного сопротивления в одном мотке не превышало 98 Н/мм², что требуется ГОСТом 2246-70.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Среди сильных сторон данного исследования необходимо отметить полученные результаты по улучшению качества выпускаемой продукции методом замены операции промежуточного отжига в печи на электроконтактный отжиг. Это снизило количество обрывов при волочении стальной омедненной сварочной проволоки при прохождении технологического маршрута производства. Применение разработанной системы автоматического управления температурными режимами при изменении скоростных режимов в процессе выполнения технологического маршрута позволило повысить однородность проволоки в соответствии и требования по ГОСТу 2246-70. Применение данной технологии уменьшило показатели отбраковки проволоки на выходе операции волочения на 80 %, таким образом, снижая себестоимость производства, почти на 40 %.

Weaknesses. Слабые стороны данного исследования связаны с тем, что при внедрении электроконтактного отжига на производстве необходимо затраты на монтаж и настройку дополнительного оборудования наподобие экспериментальной установки, приведенной на рис. 2.

Opportunities. Дополнительные возможности кроются в возможности применения данного метода для повышения качества при производстве других видов выпускаемой продукции при незначительной перенастройке системы автоматического управления температурными режимами.

Threats. Существует другой перспективный и развивающийся способ отжига – индукционный нагрев, то есть нагрев «внутренним» теплоносителем [18, 19]. Анализ указанного способа термообработки показывает, что данный способ позволяет:

- осуществлять термическую обработку в автоматизированных поточных линиях;
- значительно уменьшить угар металла и практически исключить обезуглероживание;
- существенно сократить длительность отжига.

8. Выводы

1. Разработана рациональная схема расположения электроконтактных роликов относительно проволоки, предотвращающая соскальзывание проволоки с роликов по мере её перемещения и обеспечивая равномерное распределение усилий натяжения проволоки при волочении. Применение данной схемы расположения электроконтактных роликов относительно проволоки с возможностью их охлаждения обеспечивает выполнение электроконтактного нагрева проволоки в соответствии с требованиями технологического процесса. А именно – равномерный прогрев всей проволоки как по поверхности, так и внутри, что позволит вытянуть проволоку в меньший диаметр с однородной структурой материала проволоки.

2. Определены значения механических параметров омеднённой сварочной проволоки для технологического маршрута по производству проволоки диаметром 1,6 мм при применении электроконтактного отжига:

- предел прочности – $770 \div 850 \text{ Н/мм}^2$;
- относительное удлинение – $5 \div 10 \%$.

Для производства проволоки диаметров 1,2 мм:

- предел прочности – $700 \div 770 \text{ Н/мм}^2$;
- относительное удлинение $5 \div 10 \%$.

Показано, что механические параметры стальной проволоки после электроконтактного отжига удовлетворяют требованиям по выдвигаемому ГОСТу к полученной продукции. Данные параметры также обеспечивают стабильность процесса дальнейшего волочения с омеднением без обрыва обрабатываемой проволоки за счет снятия в металле внутреннего напряжения, образующиеся при предшествующем волочении.

3. Подтверждена необходимость применения системы автоматического регулирования температуры при электроконтактном отжиге для обеспечения однородности мелкозернистой внутренней структуры проволоки и стабильной работы всей системы, путем контроля температуры и управляющего воздействием по току за счет использования обратных связей. САР предотвращает перегрева и обрыв проволоки.

Литература

1. Alimov, V. Physical and mechanical properties of welding wire [Text] / V. Alimov, A. Maksakov, O. Pushkina, D. Ponomarenko // Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. – 2013. – Vol. 1, No. 102. – P. 94–101.

2. Volochai, O. Perspektivy rozvitiia ukrainskogo rynku svarochnogo oborudovaniia i materialov [Electronic resource] / O. Volochai // Stroitel'stvo i rekonstruktsiia. – No. 8. – Available at: \www/URL: <http://weldingsite.in.ua/st21.html>
3. Provoloka svarochnaia SVO8G2S omednennaia v katushkah i kassetah [Electronic resource] // Megaprom. – Available at: \www/URL: <http://www.metizorel.ru/prov2246.html>
4. Kazmin, V. P. Sravnitel'nyi analiz sposobov otzhiga provoloki [Text] / V. P. Kazmin // Izvestiia Tomskogo ordena oktiabr'skoi revoliutsii i ordena trudovogo krasnogo znamenii politehnicheskogo instituta imeni S. M. Kirova. – 1976. – Vol. 266. – P. 59–61.
5. Krupin, A. V. Plasticheskaia deformatsiia tugoplavkikh metallov [Text]: Handbook / A. V. Krupin, V. Ya. Solov'ev. – Moscow: Metallurgiiia, 1971. – 350 p.
6. Kudrin, V. A. Teoriia i tehnologiia proizvodstva stali [Text]: Handbook / V. A. Kudrin. – Moscow: Mir, OOO «Izdatel'stvo ACT», 2003. – 528 p.
7. GOST 2246-70. Provoloka stal'naia svarochnaia. Tehnicheskie usloviia [Text]. – Introduced: 1973-01-01. – Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1973. – 17 p.
8. Artemev, S. Analysis of methods of receipt of continuous fibers of threadlike crystals [Text] / S. Artemev, V. Shaporev // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Mechanical-technological systems and complexes. – 2016. – No. 17 (1189). – P. 14–18.
9. Pupan, L. I. Perspektivnye tehnologii polucheniiia i obrabotki materialov [Text] / L. I. Pupan, V. I. Kononenko. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2008. – 261 p.
10. Belianin, R. V. Analiz vliianiia sposoba izgotovleniia mednoi katanki na harakteristiki mednoi provoloki [Text] / R. V. Belianin // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Mechanical-technological systems and complexes. – 2013. – No. 11 (985). – P. 175–182.
11. Zapotiela, F. The Effects of Applied Strain and Heat Treatment on the Properties of NiTi Wire During Shape Setting [Text] / F. Zapotiela. – Robert E. Kennedy Library, Cal Poly, 2010. – 111 p. doi:[10.15368/theses.2010.143](https://doi.org/10.15368/theses.2010.143)
12. Zybin, I. N. Features of renewal of conical surfaces of details by electro-contact welding of the wire [Text] / I. N. Zybin, A. S. Kovalenko // Science Almanac. – 2016. – No. 6-2 (20). – P. 57–63. doi:[10.17117/na.2016.06.02.057](https://doi.org/10.17117/na.2016.06.02.057)
13. Cao, J. Effects of Drawing and Annealing on Properties of Ag-4Pd Alloy Bonding Wire [Text] / J. Cao // Journal of Mechanical Engineering. Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 52, No. 1. – P. 92–97. doi:[10.3901/jme.2016.18.092](https://doi.org/10.3901/jme.2016.18.092)
14. Liashenko, V. P. Opredelenie parametrov upravleniia dvizhushchegosia sosredotochenogo istochnika tepla [Text] / V. P. Liashenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Mechanical-technological systems and complexes. – 2013. – No. 16 (989). – P. 177–182.
15. Khrebtov, E. Plication of the frequency controlled electric drive for drawing machine MV–1000V [Text] / E. Khrebtov, A. Kulik // Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University. – 2014. – Vol. 6, No. 1 (89). – P. 11–19.

16. Kovrev, G. S. Elektrokontaktnyi nagrev pri obrabotke tsvetnykh metallov [Text] / G. S. Kovrev. – Moscow: Metallurgiiia, 1975. – 312 p.
17. Khrebtov, E. Analysis of ways of wire heating in conjunction with the drawing process [Text] / E. Khrebtov // Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University. – 2015. – Vol. 3 (92). – P. 91–97.
18. Kolpak, V. P. Kompleksnye linii elektrotermicheskoi obrabotki stal'nogo prokata i provoloki [Text] / V. P. Kolpak, A. N. Leshchenko, L. M. Poltoratskii, A. V. Boiarintseva // OTTOM-4. – 2003. – Vol. 1. – P. 42–44.
19. Gul, Yu. P. Intensifikatsiia protsessa sferoidiziruiushchego otzhiga stali v potochnykh liniiah [Text] / Yu. P. Gul, M. A. Sobolenko // Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriia: Starodubovskie chteniia. – 2011. – Vol. 58. – P. 197–202.

НЕ ЯВЛЯЕТСЯ ПЕРВИЗДАТМЕМ