

УДК 669.017:621.771

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

БОЛЬШАКОВ В. И.^{1*}, *д.т.н., проф.*,

СУХОМЛИН В. И.^{2*}, *к.т.н.*

СОБОЛЕВСКИЙ С. И.^{3*}, *к.т.н.*

ОВЧАРУК С. А.^{3*}

ВОЛОХ В. И.^{4*}

^{1*} Кафедра материаловедения и обработки материалов (МиОМ), Государственное высшее учебное заведение (ГБУЗ) "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры" (ПГАСА), ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (056) 745 23 72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

^{2*} Кафедра физики конденсированного состояния (ФКС), Государственное высшее учебное заведение (ГБУЗ) "Днепродзержинский государственный технический университет" (ДГТУ), ул. Днепростроевская, 2, 51918, Днепродзержинск, Украина, тел. +38 (0569) 53-02-62, e-mail: v_suhomlyn@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3673-1353

^{3*} ООО "УКРАГРОМЕТПРОМ", а/я 4915, 49098, Днепр, Украина, тел. +38 (056) 370-59-30, e-mail: prommetiz1@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0024-764X

^{3*} ООО "УКРАГРОМЕТПРОМ", а/я 4915, 49098, Днепр, Украина, тел. +38 (056) 370-59-30, e-mail: uamp@a-teleport.com, ORCID ID: 0000-0001-8673-2402

^{4*} ПАО Днепровский металлургический комбинат, ул. Соборна, 18Б, 51925, Каменское, Украина, тел. +38 (0569) 53-18-68, e-mail: aliha2004@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9476-2465

Аннотация. Для внедрения в производство новых технологических процессов сварочного производства требуется качественная наплавочная и сварочная проволока. В процессе ее производства, исходная заготовка последовательно подвергается холодной деформации и отжигу, при этом в ее структуре происходят изменения, влияющие на ряд механических и физических свойств материала. **Методика.** Используются методы растровой микроскопии для анализа микроструктуры, механические испытания, измерение коэрцитивной силы. **Цель исследования.** Определить влияние холодной деформации и промежуточного отжига на структуру, магнитные и механические свойства низкоуглеродистой стали. **Результаты.** Установлена зависимость механических свойств, коэрцитивной силы, размера зерна и количества специальных границ от режимов холодной деформации и отжига низкоуглеродистой стали. **Практическая значимость.** Использование величины коэрцитивной силы H_c , как инструмента контроля, позволяет контролировать изменения в структуре и механических свойствах заготовки на протяжении всего технологического цикла изготовления низкоуглеродистой сварной проволоки в производственных условиях.

Ключевые слова: Холодная деформация, отжиг, волочение, механические свойства, коэрцитивная сила, специальные границы, размер зерна.

ВПЛИВ ВІДПАЛУ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ХОЛОДНОДЕФОРМОВАНОЇ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

БОЛЬШАКОВ В. І.^{1*}, *д.т.н., проф.*,

СУХОМЛИН В. І.^{2*}, *к.т.н.*

СОБОЛЄВСЬКИЙ С. І.^{3*}, *к.т.н.*

ОВЧАРУК С. О.^{3*}

ВОЛОХ В. І.^{4*}

^{1*} Кафедра матеріалознавства і обробки матеріалів (МіОМ), Державний вищий навчальний заклад (ДВНЗ) "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури" ("ПДАБА"), вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 745 23 72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID 0000-0003-0790-6473

^{2*} Кафедра фізики конденсованого стану (ФКС), Державний вищий навчальний заклад (ДВНЗ) "Дніпродзержинський державний технічний університет" (ДДТУ), вул. Дніпробудівська, 2, 51918, Дніпродзержинськ, Україна, тел. +38 (0569) 53-02-62, e-mail: v_suhomlyn@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3673-1353 ф е д

^{3*} ООО "УКРАГРОМЕТПРОМ", а/я 4915, 49098, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 370-59-30, e-mail: prommetiz1@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0024-764X

^{3*} ООО "УКРАГРОМЕТПРОМ", а/я 4915, 49098, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 370-59-30, e-mail: uamp@a-teleport.com, ORCID ID: 0000-0001-8673-2402

^{4*} ПАО Днепровский металлургический комбинат, ул. Соборна, 18Б, 51925, Каменское, Украина, тел. +38 (0569) 53-18-68, e-mail: aliha2004@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9476-2465

Анотація. Для впровадження у виробництво нових технологічних процесів зварювального виробництва потрібен якісний дріт для наплавлення і зварювання. У процесі її виробництва, вихідна заготовка послідовно піддається холодній деформації і відпалу, при цьому в її структурі відбуваються зміни, що впливають на ряд механічних і фізичних властивостей матеріалу. **Методика.** Використано методи растрової мікроскопії для аналізу мікроструктури, механічні випробування, вимірювання коерцитивної сили. **Мета дослідження.** Визначити вплив холодної деформації і проміжного відпалу на структуру, магнітні і механічні властивості низьковуглецевої сталі. **Результати.** Встановлено залежність механічних властивостей, коерцитивної сили, розміру зерна і кількості спеціальних границь від режимів холодної деформації і відпалу низьковуглецевої сталі. **Практична значимість.** Використання величини коерцитивної сили H_c , як інструменту контролю, дозволяє контролювати зміни в структурі і механічних властивостях заготовки протягом усього технологічного циклу виготовлення низьковуглецевого зварного дроту в виробничих умовах.

Ключові слова: Холодна деформація, відпал, волочіння, механічні властивості, коерцитивна сила, спеціальні границі, розмір зерна.

EFFECT OF ANNEALING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF A COLD-DEFORMED LOW-CARBON STEEL

BOLSHAKOV V.I. ^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof*

SUKHOMLIN V.I. ^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.)*

SOBOLEVSKI S. Io ^{3*}, *Cand. Sc. (Tech.)*

OVCHARUK S. A. ^{3*}

VOLOH V. I. ^{4*}

^{1*} Department of Materials Science and Treatment of Materials (MSTM), State Higher Educational Establishment (SHEE) "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture," st. Chernyshevsky, 24-A, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine Tel. +38 (056) 745-23-72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

^{2*} Department of Condensed State Physics, State Higher Educational Institution "Dneprodzerzhinsk State Technical University", DGTU, ul. Dniprostroevskaya, 2, 51918, Dneprodzerzhinsk, Ukraine, tel. +38 (0569) 53-02-62, e-mail: v_suhomlyn@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3673-1353

^{3*} LLC UKRAGROMETPROM, PO Box 4915, 49098, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 370-59-30, e-mail: prommetizl@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0024-764X

^{3*} LLC UKRAGROMETPROM, PO Box 4915, 49098, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 370-59-30, e-mail: uamp@a-teleport.com, ORCID ID: 0000-0001-8673-2402

^{4*} PJSC Dneprovsky Metallurgical Plant, ul. Sobornna, 18B, 51925, Kamenskoye, Ukraine, tel. +38 (0569) 53-18-68, e-mail: aliha2004@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9476-2465

Annotation. For the introduction of new technological processes in the welding industry, high-quality surfacing and welding wires are required. In the process of its production, the initial billet is successively subjected to cold deformation and annealing, while changes occur in its structure that affect a number of mechanical and physical properties of the material. **Methodology.** The methods of raster microscopy for the analysis of microstructure, mechanical tests, measurement of coercive force are used. **Purpose of the study.** Determine the effect of cold deformation and intermediate annealing on the structure, magnetic and mechanical properties of low-carbon steel. **Results.** The dependence of mechanical properties, coercive force, grain size and the number of special boundaries on the cold-deformation modes and annealing of low-carbon steel is established. **Practical significance.** The use of the value of the coercive force H_c as a monitoring tool allows controlling changes in the structure and mechanical properties of the billet during the whole technological cycle of manufacturing low-carbon welded wire in production conditions.

Keywords: Cold deformation, annealing, drawing, mechanical properties, coercive force, special boundaries, grain size.

Введение

Технический прогресс предполагает широкое внедрение новых видов технологического применения сварочных материалов. Для изготовления наплавочной проволоки необходима качественная заготовка обеспечивающая соблюдение требованием нормативной документации к готовой сварочной проволоки.

Цель

Цель настоящей работы – показать влияние холодной деформации отжига на механические

свойства, величину зерна, коэрцитивную силу и относительное количество специальных границ, при волочении проволоки.

Методика

Исследовали заготовку, из катанки диаметром 6,8 мм, марки стали 08Г2С, производства ООО «Молдавский металлургический завод» следующего химического состава (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав катанки/The chemical composition

| C | MMn | SSi | S | P | CCr | NNi | CCu |
|------|-----|------|-------|-----|-----|-----|-----|
| 0,06 | 0,7 | 0,25 | 0,025 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |

Таблица 2

Механические свойства катанки и проволоки
/Mechanical properties after drawing./

| Диаметр проволоки | σ_T , МПа | σ_B , МПа | δ % | Ψ % |
|----------------------------------|------------------|------------------|------------|----------|
| диаметр 6,8 мм | 250 | 430 | 42,84 | 63,06 |
| Диаметр 3,3мм (холод. волочение) | 673 | 765 | 9,64 | 30,79 |
| Диаметр 3,3мм (после отжига) | 302 | 553 | 36,02 | 68,96 |
| Диаметр 1,2 мм | 963,72 | 1042,6 | 3,95 | 25,62 |

Исходная заготовка катанка \varnothing 6,8 мм, после первой стадии холодного волочения – \varnothing 3,3мм; промежуточный отжиг в печи при $t=750^\circ\text{C}$, конечный диаметр проволоки после повторного волочения \varnothing 1,2мм.

Схема производственного волочения: исходная заготовка катанка \varnothing 6,8 мм протягивалась через калибр до \varnothing 3,3 мм; затем эту проволоку \varnothing 3,3 мм отжигали в печи при $t=750^\circ\text{C}$ в течении 10 часов после отжига проволоку протягивали через калибр до \varnothing 1,2мм. Механические испытания образцов проволоки на растяжение производились в соответствии с ГОСТ 1797 на испытательной машине ТТМ-500. Металлографические исследования структуры проводились на автоматическом анализаторе структур IA 32 и растровом электронном микроскопе РЭМ-106И. Металлографические шлифы готовили по стандартной методике [3].

Коэрцитивная сила определялась полуавтоматическим коэрцитиметром КРМ-Ц-К2М

Использованы результаты собственных работ, в которых при разных режимах охлаждения проведены исследования структуры и специальных границ в сталях 09Г2С, и 3пс [1], а в работе [2] исследована эвтектидная сталь У8. Автором работы [5] установлено, что с повышением температуры аустенитизации увеличивается количество специальных границ в конечной структуре, что приводит к снижению энергии зернограничного комплекса.

Результаты этих работ легли в основу их практического применения при исследовании структуры и свойств проволоки, полученной в промышленных условиях.

Относительное количество специальных границ определяли методом секущих [4]. Специальные границы выявляли по основным признакам, описанным в работе [6], наличие которых прямо указывает на принадлежность границ зерен к специальным (низкоэнергетическим). Если граница разделяется на 2-3 однонаправленные участки (фасетки), то такая граница является специальной, если оба конца границы входят в тройные стыки с противоположными углами превышающие 170° , то эта граница принадлежит к специальным и граница является специальной, если она одним концом входит в четверной или пятерной стык, а другим концом в тройной стык с противоположным углом более 170° [5, 7].

Измерения проводили на полях по пяти секущим и определяли среднее значение

Результаты

Установлено, что промышленное волочение катанки вызвало изменение механических свойств, размера зерна, коэрцитивной силы, а после отжига увеличилось относительное количество специальных границ.

Результаты исследования механических свойств катанки и проволоки приведены в таблице 2

Результаты исследования микроструктуры на различных этапах производства проволоки.

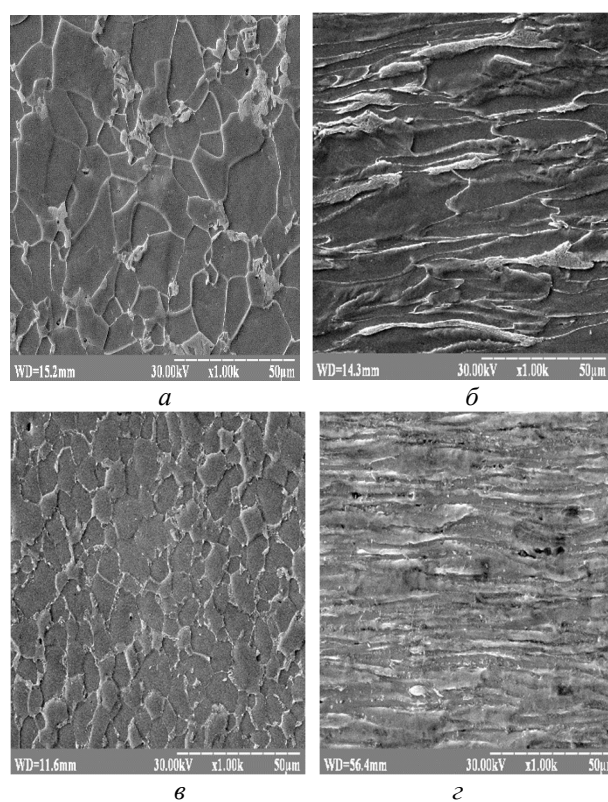


Рис. 1. Микроструктура после волочения проволоки а - заготовка- катанка \varnothing 6,8мм; б - после холодного волочения \varnothing 3,3мм; в - после холодного волочения и отжига \varnothing 3,3мм; г-конечная проволока \varnothing 1,2 мм/
Microstructure after wire drawing а - wire rod \varnothing 6,8мм; б - after cold drawing \varnothing 3,3мм; в - after cold drawing and annealing \varnothing 3,3мм, г- final wire \varnothing 1,2 mm

рисунок а – микроструктура катанки феррито-перлитная с явно выраженной полосчатой структурой и незначительного количества неметаллические включения, величина зерна составляет 10,06 мкм.

рисунок б - на стадии холодного волочения с ростом степени деформации происходит скольжение целых групп кристаллов и поворот зерен в направлении деформирования. Зерна вытягиваются и приобретают

волокнистое строение. Величина коэрцитивной силы повысилась на 68%.

рисунок 6 – после-деформационный отжиг в печи способствовало повышению пластических свойств металла. Структура приобрела мелкозернистое строение. В узлах рекристаллизованных зерен возникают перлитные колонии. Межпластинчатое расстояние в перлитных колониях увеличилось и составляет от 0,149 до 0,298 мкм. Величина зерна составляет 5,39 мкм

рисунок 2 – в результате конечной пластической деформации волочением значительно возросли прочностные свойства проволоки. Тонко волокнистая структура является результатом удлинения и деформации зерен при вытяжке металла, что подтверждается высоким значением коэрцитивной силы $H_c = 9,1 \text{ A/cm}$

В таблице 3 приведены результаты измерения коэрцитивной силы, величины зерна и количества специальных границ

Таблица 3

Результаты контроля коэрцитивной силы, специальных границ и величины зерна / Results of coercive force monitoring, Special boundaries and grain size

| Диаметр проволоки | H_c , А/см | d, мкм | С.Г. % |
|-----------------------|--------------|--------|--------|
| Ø 6,8 мм | 4,5 | 10,06 | 24,05 |
| Ø3,3мм (холод. волоч) | 7,6 | - | - |
| Ø3,3мм (после отжига) | 4,6 | 5,39 | 35,1 |
| Ø 1,2 мм | 9,1 | - | - |

Анализируя данные механических свойств установлено, что механические свойства σ_t , σ_b хорошо коррелируют с коэрцитивной силой H_c .

Научная новизна и практическая значимость

Определен наиболее технологичный параметр по температурному режиму при волочении проволоки.

Применение коэрцитивной силы H_c как инструмента контроля позволяет контролировать структуру, механические свойства проволоки на всех этапах её производства.

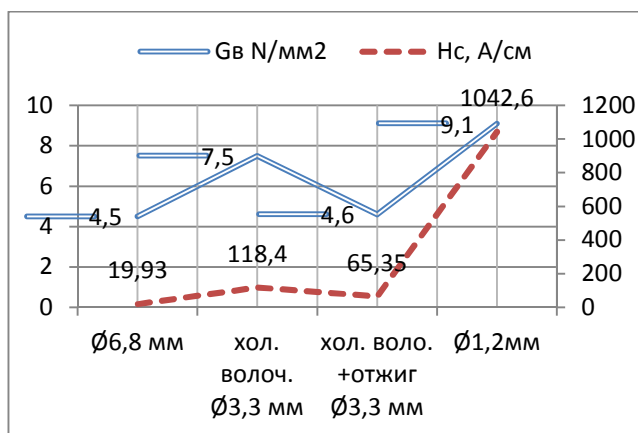


Рис.2. Изменение коэрцитивной силы и механических свойств при деформации и отжиге/ Change of coercive force and mechanical properties during deformation and annealing/

Выводы

1. Структура заготовки-катанка характеризуется величиной зерна равной 10,06 мкм. Относительное количество специальных границ составляет 24,05 %
2. Установлено, что после отжига холоднодеформированной катанки величина зерна в проволоке уменьшилась практически в два раза с 10,60 мкм до 5,58 мкм, а относительное количество специальных границ увеличилось с 24,05% до 35,1%
3. Показано, что после отжига в печи произошло измельчение зерна, увеличилось относительное количество специальных границ до 35,1%, увеличилась магнитная проницаемость, что привело к снижению величины коэрцитивной силы на 39,5%
6. Величина коэрцитивной силы H_c позволяет контролировать изменения структуры проволоки на всех этапах её производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Большаков В.И., Сухомлин В.И. и др. Специальные границы в обезуглероженном слое строительных сталей // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. Вып. 67 Днвск., ПГАСА, 2013. - С. 373-377. табл. 1.-рис. 2. / www.cgnb.dp.ua/podborka_78_gp_15.html
2. Большаков В.И., Сухомлин В.И. и др. Влияние дисперсности перлита на магнитные свойства эвтектоидной стали // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. Вып. 67-Днвск., ПГАСА, 2013. - С. 273-278. табл. 3.-рис. 6. / www.irbis-nbuv.gov.ua/cgiirbis_64.exe?
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. Ред. В.В. Клюева. Кн. 1 В.В. Клюев, В.Ф. Мужичей, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. - 2е изд., испр. - М.: Машиностроение, 2006. - 848с. <http://www.td-j.ru/index.php/news/40-2009-10-04-05-39-55/112>
4. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. - М.: Мет-гия, 1970. - 375 с. <http://www.twirpx.com/file/825320/>
5. Сухомлин Г.Д. Специальные границы в феррите низкоуглеродистых сталей // Металлофизика и новейшие технологии. – 2013. Т. 35, № 9 – С. 1237-1249. http://mars.arbicon.ru/?mdl=journal_info&id_journal=981
6. Сухомлин Г.Д. Множественные специальные стыки границ зерен в ГЦК поликристаллах. // ФММ, т. 54, вып. 2. - 1982. - С. 402-405 <http://fmm.imp.uran.ru/?raz=about>
7. Bolshakov V., Sukhomlin G., Laukhin D., Beketov O., Derkach T., Kuksenko V. Special boundaries and plural grain boundary junctions in the hypoeutectoid ferrite of low-carbon steels. // Theoretical foundations of civil engineering. – Warszawa.: Polit. Warsh. – 2007. – P. 73-80 <https://architektura.um.warszawa.pl/>

REFERENCES

1. Bolshakov VI, Sukhomlin V.I. And others. Special boundaries in the decarburized layer of building steels // Construction, material science, engineering: Sb.nauch.trudov.Vyp.67Dnvsck., PGAASA, 2013.-P.373-377.tabl.1.-pic.2. / www.cgntb.dp.ua/podborka_78_gp_15.html
2. Bolshakov VI, Sukhomlin VI And others. Special boundaries in the decarburized layer of building steels // Construction, material science, engineering: Sb.nauch.trudov.Vyp.67Dnvsck., PGAASA, 2013.-P.373-377.tabl.1.-pic.2. / www.irbis-nbuv.gov.ua/.../cgiirbis_64.exe?
3. Nerazrushayushiy kontrol: Spravochnik v 8 t. / Pod obsch. red. V.V. Klyueva. Kn.1 V.V. Klyuev, V.F. Muzhetsei, E.S. Gorkunov, V.E. Scherbinin. Magnitnye metody kontrolya. 2-e izd., ispr. - M.: Mashinostroenie, 2006.-848s. <http://www.td-j.ru/index.php/news/40-2009-10-04-05-39-55/112>
4. Saltykov S.A. Stereometricheskaya metallografiya. - M. Metallurgiya,1970. -375 s. <http://www.twirpx.com/file/825320/>
5. Sukhomlin G.D. Spetsyalnye granitsy v ferrite nizkouglerodistykh stalei. //Metallofizika i noveishie tehnologii. – 2013. T. 36, № 9 – С.1237-1249. http://mars.arbicon.ru/?mdl=journal_info&id_journal=981
6. Sukhomlin G.D. Mnozhestvennye spetsialnye ctyki granits zeren v GTSK polikristallah. //FMM, t. 54, vyp. 2. – 1982.– С. 402-405. <http://fmm.imp.uran.ru/?raz=about>
7. Bolshakov V., Sukhomlin G., Laukhin D., Beketov O., Derkach T., Kuksenko V. Special boundaries and plural grain boundary junctions in the hypoeutectoid ferrite of low-carbon steels. // Theoretical foundations of civil engineering. – Warszawa.: Polit. Warsh. – 2007. – P. 73-80 <https://architektura.um.warszawa.pl/>

Статья рекомендована к публикации д-ром.техн.наук, проф. Д. В. Лаухиньм (Украина); д-ром.физ.-мат.наук, проф. А. Б. Лысенко (Украина)