



УДК 669

ДЕФЕКТЫ МИКРОСТРУКТУРЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ СТЫКОВОЙ СВАРКИ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Е. С. СЕРЕГИНА, Т. Н. АЮПОВА, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: nmg.czl@bmz.gomel.by.

Обобщен практический опыт исследования дефектов микроструктуры сварных соединений волооченой и патентованной проволоки из высокоуглеродистой стали, выполненных стыковой сваркой сопротивлением, и обрывов, происходящих вследствие указанных дефектов. Для установления причин их образования выполнены сварные соединения с моделированием условий, способствующих появлению дефектов, а затем исследованы. Изучение внешнего вида, макро- и микроструктуры проводили с помощью стереоскопического и металлографического микроскопов в металлографической лаборатории. На основании результатов и опыта исследований, анализа литературных источников представлены изображения, вид и характеристика, условия и причины образования следующих дефектов микроструктуры сварных соединений и обрывов проволоки: мартенсит, глобулярный цементит, грубодispersный перлит, феррит, крупнозернистый перлит. Результаты научной работы необходимы для определения, предупреждения и устранения причин образования дефектов микроструктуры в процессе выполнения и контроля качества сварных соединений, определения и предупреждения обрывов и разрушений вследствие дефектов на всех этапах производства, обеспечения стандартизованного подхода к контролю и исследованию.

Ключевые слова. Стыковая сварка сопротивлением, высокоуглеродистая проволока, сварной шов, обрывы, дефекты микроструктуры, причины образования дефектов.

MICROSTRUCTURAL DEFECTS IN WELDED JOINTS OF HIGH-CARBON STEEL WIRE AFTER RESISTANCE BUTT WELDING

A. S. SIAROHINA, T. N. AYUPOVA, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”, Zhlobin, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: nmg.czl@bmz.gomel.by.

This paper summarizes the practical experience of studying microstructural defects in welded joints of drawn and patented high-carbon steel wire made by resistance butt welding, and the breaks that occurred due to these defects. To establish the causes of the defect formation, welded joints were made with simulation of the conditions contributing to their formation, and then examined. Examination of the appearance, macro- and microstructure was carried out using a stereoscopic and metallographic microscope in a metallographic laboratory. Based on the results and experience of the research, analysis of literary sources, images, appearance and characteristics, conditions and causes of the formation of the following microstructural defects of welded joints and wire breaks are presented: martensite, globular cementite, coarse-dispersed pearlite, ferrite, coarse-grained pearlite. The research results are necessary to identify, prevent and eliminate the causes of microstructural defects in the process of performing and quality control of welded joints, to identify and prevent breaks and failures due to defects at all stages of production, to ensure a standardized approach to control and research.

Keywords. Resistance butt welding, high-carbon wire, weld, breaks, microstructural defects, causes of defect formation.

Контактная сварка – один из наиболее распространенных видов получения неразъемных соединений разнообразных конструкционных материалов в широком диапазоне толщин и сечений. Стыковая сварка сопротивлением является разновидностью контактной, применяется в основном при соединении проволоки, стержней и труб из углеродистой и легированной стали относительно малых компактных сечений. В ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» стыковая сварка сопротивлением используется для соединения концов проволоки при задаче катанки или заготовки в стан для волочения, агрегат для термообработки, при замене волок, обрывах проволоки [1].

При стыковой сварке сопротивлением нагрев осуществляется без оплавления стыкуемых концов деталей. В процессе сварки торцы закрепленных в зажимах сварочного аппарата деталей сжимаются с предварительным усилием, после чего включается сварочный ток. Происходит локальный нагрев стыка до температуры, близкой, но не превышающей температуру плавления. Затем сварочный ток отключается,

а усилие сжатия резко нарастает. В результате происходит значительная деформация (или осадка) нагретых поверхностей с формированием металлических связей, общих кристаллических решеток в твердом состоянии, образование соединения, выдавливание на поверхность сварочного грата [2].

После операции сварки стальной высокоуглеродистой проволоки в зоне сварного шва и перегрева образуется твердая и хрупкая микроструктура мартенсита закалки, в зоне сварного шва – сварочный грат (рис. 1). С целью снятия напряжений, предотвращения образования трещин при последующих операциях выполняют отпуск. Затем удаляют грат с помощью абразивного инструмента. Для повышения пластических свойств сварного соединения после операций сварки, отпуска, удаления грата проводят нагрев проволоки до температуры $\approx 900\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$, выдержку в течение 3–5 с, охлаждение в зажимах сварочного аппарата на воздухе $\approx 30\text{ с}$ (далее – термообработка). После термообработки микроструктура в зоне сварного шва и зоне термического влияния (далее – ЗТВ) представляет собой сорбитообразный, скрытопластинчатый перлит с различной величиной зерна по длине ЗТВ.

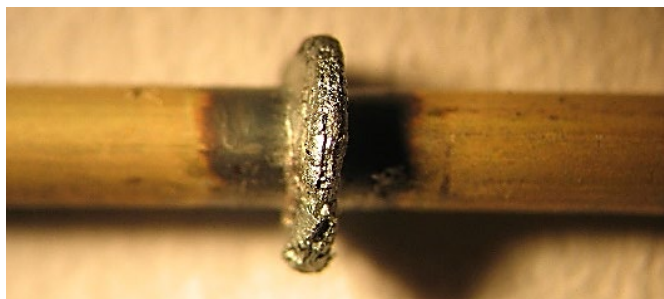


Рис. 1. Внешний вид сварного соединения с гратом латунированной проволоки после стыковой сварки сопротивлением, $\times 6$

Несмотря на высокую степень автоматизации сварочных аппаратов, такие процессы, как настройка режимов операций сварки, подготовка торцов проволоки, установка проволоки, выбор режимов, зачистка сварочного грата и окалины, выполняются оператором и зависят от его квалификации и индивидуальных качеств. Поэтому не все сварные соединения идеальны, иногда образуются дефекты, и при дальнейшей переработке проволоки случаются обрывы. В данной работе обобщен практический опыт исследования дефектов микроструктуры сварных соединений волоченой и патентованной проволоки из высокоуглеродистой стали, выполненных стыковой сваркой сопротивлением, и обрывов, происходивших по причине указанных дефектов. Для установления причин образования дефектов выполняли сварные соединения с моделированием условий, способствующих их появлению, а затем их исследовали. Изучение внешнего вида, макро- и микроструктуры проводили с помощью стереоскопического и металлографического микроскопов. На основании результатов и опыта исследований, анализа литературных источников [2–4] далее представлены изображения, виды и характеристика дефектов микроструктуры сварных соединений и обрывов проволоки вследствие дефектов, условия и причины их образования.

Мартенсит – дефект микроструктуры после термообработки в виде участков бесструктурного или игольчатого мартенсита в ЗТВ (рис. 2). Образуется при различных условиях, наблюдается в микроструктуре ЗТВ разных видов.

В случае превышения температуры нагрева и выдержки при термообработке мартенсит закалки образуется наряду с перлитом по причине высокой скорости охлаждения на локальных участках ускоренного теплоотвода, в большей степени в зоне контакта проволоки и зажимов сварочного аппарата (рис. 2, *а*), в меньшей степени в виде включений по всей ЗТВ (рис. 2, *б*). В случае низкой температуры нагрева и выдержки при термообработке в зависимости от степени в зоне сварного шва и перегрева (бывшей закаленной зоне) образуется мартенсит отпуска или мартенсит отпуска с остатками мартенсита закалки на локальных участках (рис. 2, *в*).

На поверхности латунированной проволоки мартенсит образуется в околосшовной зоне по границам зерен (рис. 2, *з*) вследствие диффузии меди из латунного покрытия и растворения ее в аустените. Так как медь замедляет превращение аустенита, при охлаждении после операции сварки и после термообработки на участках, обогащенных медью, образуется легированный мартенсит. Причина образования дефекта – перегрев во время операции сварки, большое время нагрева, большое значение тока сварки, малое усилие осадки, большая установочная длина, загрязнение, износ зажимов.

Обрыв проволоки с микроструктурой мартенсита на локальном участке происходит при волочении вследствие недостаточной пластичности мартенсита, представляет собой хрупкое разрушение (рис. 2, *д*).

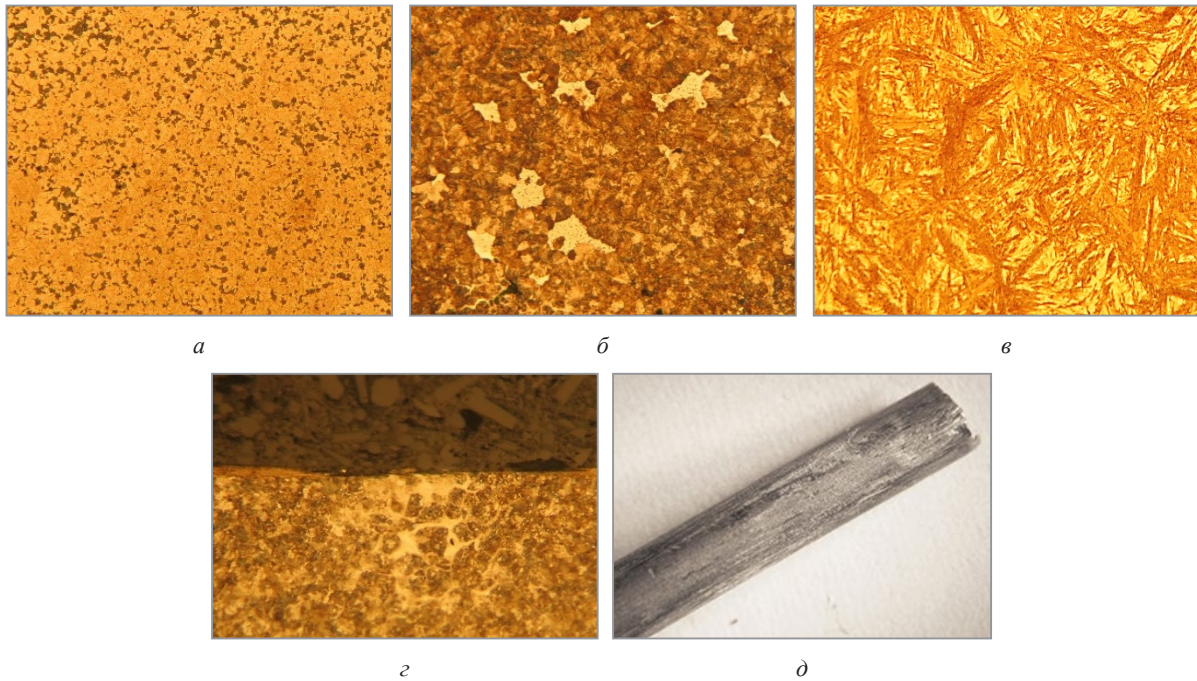


Рис. 2. Мартенсит закалки в зоне зажимов, $\times 50$ (а). Включения мартенсита закалки в микроструктуре перлита, $\times 50$ (б), мартенсита отпуска, $\times 200$ (в). Легированный мартенсит по границам зерен, $\times 100$ (г). Продольное сечение проволоки, травление в реактиве Нитал, изображение в светлом поле. Внешний вид проволоки с обрывом по причине наличия мартенсита, $\times 9$ (д)

Глобулярный цементит – дефект микроструктуры в виде глобулярного цементита в основной структуре мелкозернистого пластинчатого перлита в ЗТВ (рис. 3). Причины образования – низкая температура, малая выдержка при последнем нагреве в случаях неоднократной термообработки.

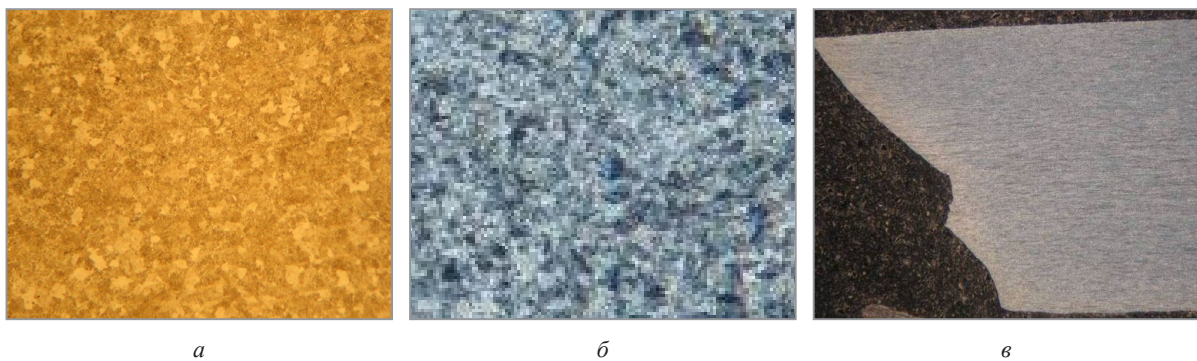


Рис. 3. Микроструктура патентированной заготовки, $\times 500$ (а, б), макроструктура волооченной проволоки с обрывом типа «Сужение», $\times 16$ (в), с глобулярным цементитом в ЗТВ. Продольное сечение, травление в реактиве Нитал, изображение в светлом (а) и темном (б, в) поле

Обрыв проволоки с микроструктурой глобулярного цементита на локальном участке при волочении происходит вследствие недостаточной прочности, представляет собой пластичное разрушение типа «Сужение» (рис. 3, в).

Грубодисперсный перлит – дефект микроструктуры в виде грубодисперсного крупнозернистого перлита в ЗТВ (рис. 4, б, в). Причины образования – длительная выдержка, низкая скорость охлаждения при термообработке.

Обрыв проволоки с микроструктурой, содержащей грубодисперсный перлит на локальном участке, происходит при волочении вследствие недостаточной прочности и пластичности, представляет собой хрупкое разрушение по поверхностной или осевой трещине (рис. 4).

Феррит – дефект микроструктуры в виде полоски структурно-свободного феррита в зоне сварного шва и околшововой зоне (рис. 5, а, б). Причины образования – выгорание углерода в зоне сварного шва, недостаточное усилие сжатия соединяемых торцов проволоки, неудовлетворительная подготовка торцов (наличие загрязнений, не перпендикулярный рез).

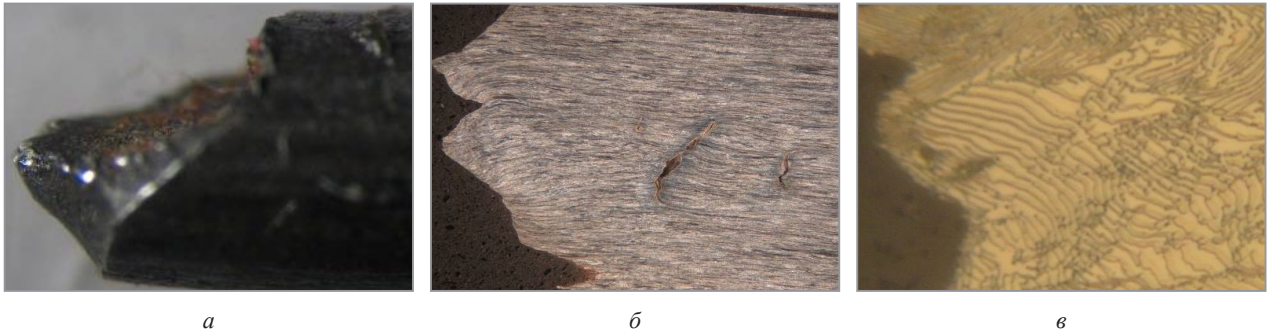


Рис. 4. Внешний вид, $\times 12$ (а), макроструктура, $\times 16$ (б), микроструктура, $\times 330$ (в) волооченой проволоки с обрывом типа «Осевая трещина» по причине грубодисперсного перлита. Продольное сечение, травление в реактиве Нитал, изображение в темном (б) и светлом (в) поле

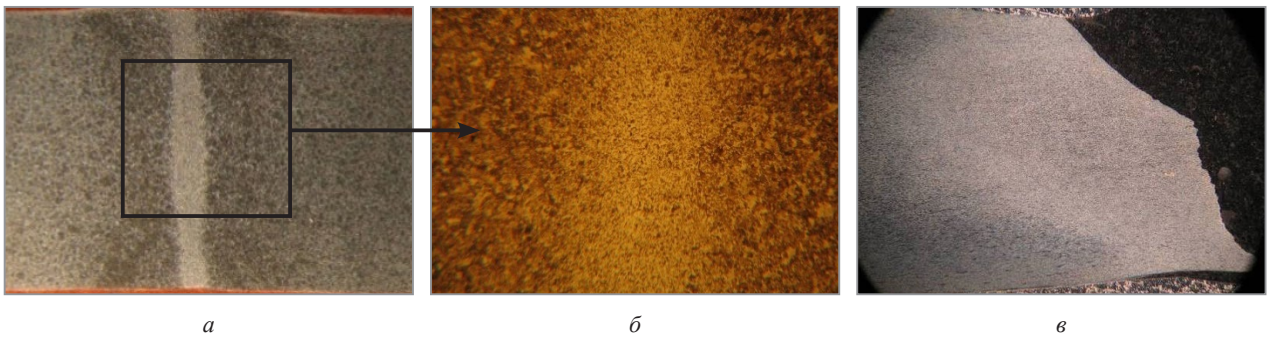


Рис. 5. Макроструктура, $\times 10$ (а) и микроструктура, $\times 70$ (б) с полоской структурно-свободного феррита в зоне сварного шва проволоки. Макроструктура волооченой проволоки с обрывом типа «Сужение», $\times 16$ (в). Продольное сечение, травление в реактиве Нитал, изображение в светлом поле

Наличие микроструктуры структурно-свободного феррита на локальном участке вызывает снижение прочности проволоки в зоне сварного шва и, как следствие, образование при волочении пластичного обрыва типа «Сужение» (рис. 5, в).

Крупнозернистый перлит – дефект микроструктуры в виде крупнозернистого перлита в ЗТВ, в некоторых случаях наблюдаются участки видманштетта, окисление, микротрещины и трещины по границам зерен (рис. 6). Причина образования – превышение температуры нагрева и выдержки при термообработке, т. е. перегрев, пережог.

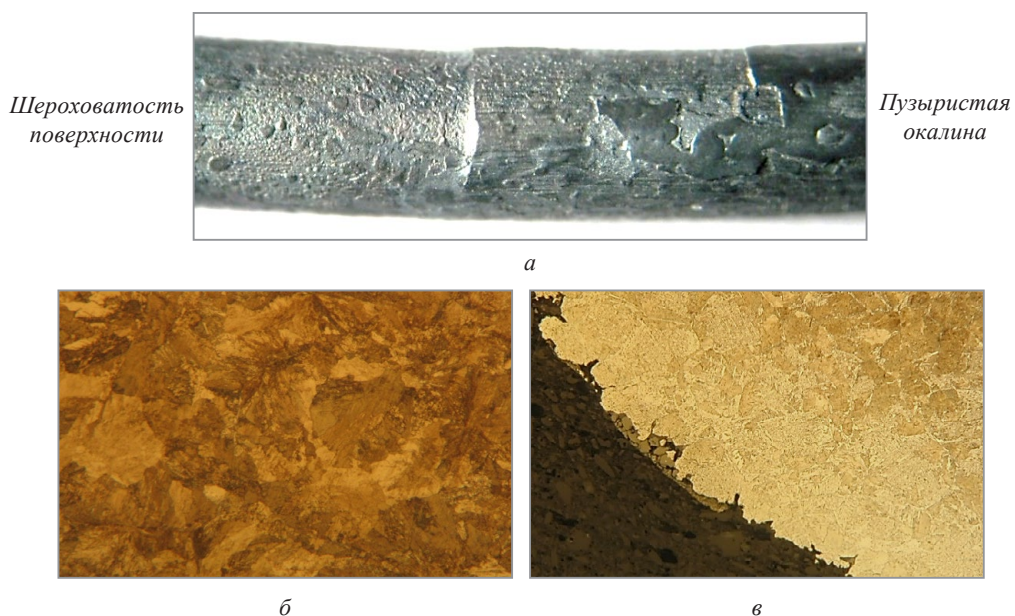


Рис. 6. Внешний вид поверхности проволоки с перегревом, $\times 10$ (а). Микроструктура крупнозернистого перлита, $\times 500$ (б), крупнозернистого перлита с видманштеттом, $\times 100$ (в). Поперечное сечение, травление в реактиве Нитал, изображение в светлом поле

Признаки перегрева и пережога, видимые на поверхности под стереоскопическим микроскопом, – наличие пузыристой окалины, шероховатости поверхности стальной основы вследствие пузыристой окалины (рис. 6, а). В случае пережога наблюдаются трещины и микротрещины на поверхности.

Наличие микроструктуры с крупнозернистым перлитом, видманштеттом, микротрещинами и трещинами в зоне сварного соединения вызывает снижение прочностных и пластических свойств, образование трещин и обрывов при волочении. Обрыв представляет собой хрупкое разрушение проволоки (рис. 7).

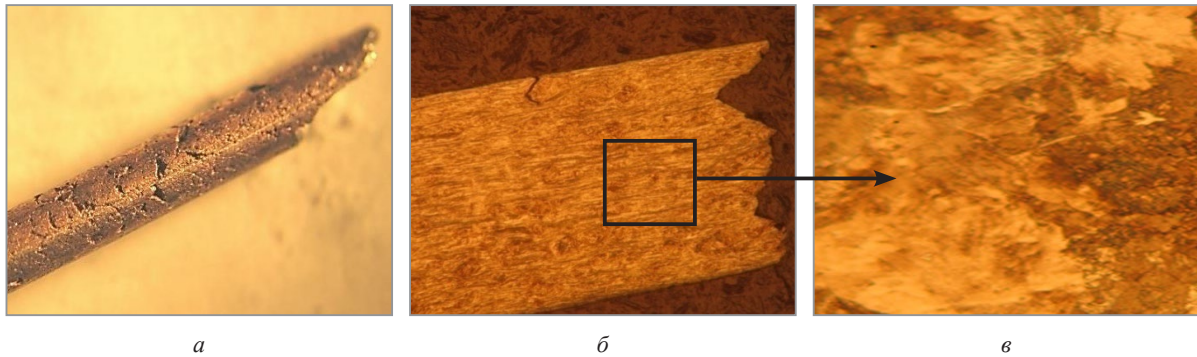


Рис. 7. Внешний вид с трещинами, $\times 7$ (а), крупнозернистая микроструктура, $\times 25$ (б), $\times 600$ (в) волоченой проволоки с обрывом. Продольное сечение, травление в реактиве Нитал, изображение в светлом поле

Выводы

1. В результате металлографических исследований представлены изображения, виды, характеристика дефектов микроструктуры сварных соединений волоченой и патентированной проволоки из высокопрочной стали, выполненных стыковой сваркой сопротивлением, и обрывов проволоки вследствие дефектов, определены причины их образования.

2. Результаты исследований необходимы для определения, предупреждения и устранения причин образования дефектов микроструктуры в процессе выполнения и контроля качества сварных соединений, определения и предупреждения обрывов и разрушений вследствие дефектов на всех этапах производства, обеспечения стандартизованного подхода к контролю и исследованию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Метизное производство: практическое пособие / под общей редакцией А.Н. Савенка. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2019. – 315 с.
2. Катаев, Р.Ф. Теория и технология контактной сварки / Р.Ф. Катаев, В.С. Милютин, М.Г. Близник. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 144 с.
3. Кабанов, Н.С. Сварка на контактных машинах: учебник для проф.-техн. учебн. зав. / Н.С. Кабанов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1973. – 255 с.
4. Сварка в машиностроении: справочник: в 4 т. / Г.А. Николаев [и др.] – М.: Машиностроение, 1978. – 504 с.

REFERENCES

1. Savenok A. N. (ed.) *Metiznoe proizvodstvo: prakt. posobie* [Hardware production: a practical guide]. Gomel, GGTU im. P. O. Sukhoi Publ., 2019, 315 p.
2. Kataev R. F., Milyutin V. S., Bliznik M. G. *Teoriya i tekhnologiya kontaktnoj svarki* [Theory and technology of contact welding]. Ekaterinburg, Ural university Publ., 2015, 144 p.
3. Kabanov N. S. *Svarka na kontaktnykh mashinah: uchebnik dlya prof.-tekhn. uchebn. zav.* [Welding on contact machines: a textbook for professional technical specialists.]. Moscow, Vyssh. shkola Publ., 1973, 255 p.
4. Nikolaev G. A. (et al.) *Svarka v mashinostroenii: spravochnik: v 4 t.* [Welding in mechanical engineering: reference book]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 504 p.