

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.2.06

УДК 621.791

**Е.М. Федосеева**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия**МЕХАНИЧЕСКАЯ И СТРУКТУРНАЯ  
МИКРОНЕОДНОРОДНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
СТАЛИ Х65**

Основными видами неоднородности сварного соединения являются: структурно-химическая макро- и микронеоднородности металла, связанные с наличием литого металла шва, зоны термического влияния и основного металла (макронеоднородность), с наличием зерен, границ зерен, фаз и включений в пределах каждой зоны сварного соединения (микронеоднородность). Для сварных соединений характерно различие механических свойств и микроструктуры металла в разных участках, соизмеримых с размерами соединения, называемое механической и структурной микронеоднородностью. Особенностью соединений, выполненных сваркой плавлением, является наличие зон с различными механическими свойствами и микроструктурой. К шву примыкает ряд зон, свойства и протяженность которых зависят от исходного структурного состояния, теплового режима сварки, длительности пребывания металла при высоких температурах и скорости его охлаждения. Исследована структурная микронеоднородность сварного шва из стали Х65. Показана взаимосвязь структурной и механической микронеоднородности на примере изменения структурно-фазового состава и твердости сварных соединений. Соотношение структурных составляющих по сечению вдоль шва меняется незначительно. Однако четко прослеживается изменение фазового состава. Многослойный сварной шов стали Х65 в заполняющих слоях имеет ферритно-бейнитную (участками мартенситную) структуру, которая отличается от структур других частей сварного шва. В этой области наблюдается увеличение твердости металла шва, но в целом уровень твердости металла шва и зоны термического влияния на 5–15 единиц выше уровня твердости основного металла стали Х65, что обеспечивает надежность и равнопрочность сварного шва с основным металлом.

**Ключевые слова:** структурная микронеоднородность, фазовый состав, твердость, сварной шов, зона термического влияния, перлит, бейнит, мартенсит, околошовная зона, погонная энергия.

**Е.М. Fedoseeva**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federatuion

**MECHANICAL AND STRUCTURAL MICROINHOMOGENEITY  
OF WELDED COMPOUNDS OF X65 STEEL**

Main types of heterogeneity of welded connection are: structural and chemical macro- and the microinhomogeneities of metal connected with availability of cast metal of a seam, zone of thermal influence and the main metal (macroinhomogeneity) with availability of grains, borders of grains, phases and inclusions within each zone of welded connection (microinhomogeneity). Distinction of mechanical properties and a microstructure of metal in different sites, commensurable with an amount of connec-

tion, called by mechanical and structural heterogeneity is characteristic of welded connections. Most characteristic of the connections executed by welding by melting is existence of zones with various mechanical properties and a microstructure. The seam is adjoined by a number of zones which properties and extent depend on an initial structural condition, the thermal mode of welding, duration of stay of metal at high temperatures and speed of his cooling. Structural microinhomogeneity of a welded seam from X65 steel is investigated. The interrelation of structural and mechanical microinhomogeneity, on the example of change of structural and phase structure and firmness of welded connections is shown. The ratio of structural components on section along a seam changes not considerably. However, change of phase structure is accurately traced. The welded seam of X65 steel in the filling layers has ferritno-beynitny (sites martensitny) structure which differs from other parts of a welded seam. In this area increase the hardness of metal of a seam is observed, but in general the level of hardness of metal of a seam and zone of thermal influence makes 5-15 units above than the level of hardness of the main metal of X65 steel that provides reliability and uniform strength of a welded seam with the main metal.

**Keywords:** microstructural heterogeneity, phase structure, hardness, a welded seam, zone of thermal influence, perlite, beynit, martensite, heat affected zone, running energy.

Технологические операции, применяемые в процессе изготовления сварных конструкций, могут существенно снижать начальную термодинамическую устойчивость свариваемого металла в связи с дополнительной гетерогенностью, обусловленной появлением различного рода неоднородностей.

Основными видами неоднородности сварного соединения являются: структурно-химическая макро- и микронеоднородности металла, связанные с наличием литого металла шва, зоны термического влияния и основного металла (макронеоднородность), с наличием зерен, границ зерен, фаз, включений и т.д. в пределах каждой зоны сварного соединения (микронеоднородность); неоднородность упругопластического напряженного состояния, вызванная неравномерным распределением остаточных напряжений и деформаций в сварном соединении; геометрическая неоднородность, связанная с наличием дефектов сварного шва, конструктивных концентраторов, зависящих от типа сварного шва [1–5].

Наиболее характерной особенностью соединений, выполненных сваркой плавлением, является наличие зон с различными механическими свойствами и микроструктурой. Сварное стыковое соединение в поперечном сечении имеет несколько участков, которые могут существенно различаться между собой по механическим свойствам и микроструктуре (рис. 1). Это сварной шов, околшовная зона (зона термического влияния – ЗТВ), материал, которой у ряда сталей претерпевает структурные превращения и может иметь повышенные твердость и прочность. Далее расположена зона, нагревшаяся до более низких температур (основной металл).

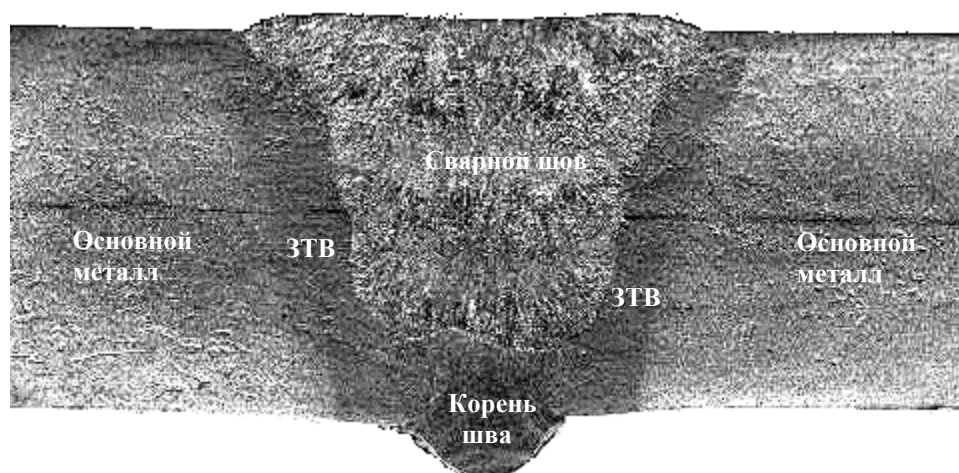


Рис. 1. Сварное стыковое соединение стали X65 в поперечном сечении

В той или иной мере для сварных соединений характерно различие механических свойств и микроструктуры металла на разных участках, соизмеримых с размерами соединения. Такое различие называется механической и структурной микронеоднородностью [6]. Металл шва имеет литую структуру, но свойства зависят от химического состава металла, скорости охлаждения, характера кристаллизации и других факторов. К шву примыкает ряд зон, свойства и протяженность которых зависят от исходного структурного состояния, теплового режима сварки, длительности пребывания металла при высоких температурах и скорости его охлаждения.

Сварные конструкции выполняют из различных сплавов, влияние термического эффекта сварки этих сплавов вызывает появление (в зависимости от исходного состояния) закалочных структур [6, 7], т.е. твердых прослоек, или же зон с пониженной твердостью, т.е. мягких прослоек.

Поскольку работоспособность сварных соединений зависит от протяженности твердых и мягких прослоек, т.е. от характера распределения твердости и микроструктуры в сварном соединении, изучение их в сварных швах конструкций ответственного назначения, таких как трубопроводы, является достаточно актуальным.

В работе изучены механическая и структурная микронеоднородность сварных соединений из стали X65 (см. рис. 1). Сталь X65 является микролегированной сталью, широко используемой при строитель-

ве магистральных трубопроводов. Сталь X65 (класс прочности K56–K60) считается микролегированной, потому как химический состав стали X65 для производства труб с толщиной стенки 13,7–30 мм кроме основных элементов: С (0,05–0,13 %), Мп (1,28–1,78 %), Si (0,13–0,39 %) – содержит микролегирующие добавки: Nb (0,015–0,072 %), V (0,02–0,09 %) и Мо (0,19–0,35 %).

В процессе легирования стали данными элементами ее отличительной особенностью становится такое свойство, как сохранение пластичности при низкой температуре [8, 9].

Образцы сварных соединений [10] для исследований получены при сварке труб размерами 1220 × 15,7 мм комбинированной технологией РД + МПС (корень: ручная дуговая (РД) сварка, сварочные материалы ЛБ52У диаметром 3,2 мм; заполнение и облицовка: механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой, сварочные материалы Innershield NR-208S диаметром 2,0 мм).

В табл. 1 приведены режимы РД-сварки корневого и подварочного слоев шва.

Таблица 1

Режимы ручной дуговой сварки электродами с покрытием (ЛБ52У) на подъем

Слой шва	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток (А) в положении при сварке		
		нижнее	вертикальное	потолочное
Корневой	3,0–3,25	90–120	90–110	80–110
Подварочный	3,0–3,25	90–120	90–110	80–110

Сварка самозащитной порошковой проволокой выполняется на спуск постоянным током прямой полярности. Режимы механизированной сварки самозащитной порошковой проволокой Innershield приведены в табл. 2. Сварка заполняющих слоев сварных соединений труб, начиная с третьего, выполнена по методу «слой за два прохода». Облицовочный слой шва выполнен по методу «слой за три прохода».

Таблица 2

Режимы механизированной сварки самозащитной порошковой проволокой марки Innershield диаметром 2,0 мм

Слои шва	Скорость подачи проволоки, см/мин (дюйм/мин)	Напряжение, В
Заполняющие	200 (90)	18,5–19,5
Корректирующий	200 (80)	17,5–18,5
Облицовочный	200 (80)	17,5–18,5

Структурная микронеоднородность оценивалась по результатам металлографических исследований. Микроструктурный анализ проводили на металлографическом микроскопе ILM LED с цифровой камерой Leica DFC295 при увеличениях от  $\times 100$  до  $\times 400$  в режиме светлопольного освещения. Статистическую обработку результатов осуществляли с помощью программно-аппаратного комплекса «ВидеоТест–Металл 1.0», позволяющего анализировать основные структурные составляющие в стали (феррит, перлит и др.), автоматически определять содержание фаз по площади (в процентах) и сравнивать с эталонными шкалами.

Микроструктура стали X65 преимущественно ферритно-перлитная (рис. 2, а) с соотношением фазовых составляющих 40 : 60 % (балл 5). Структура полосчатая, образованная контролируемой прокаткой листов для производства сварных труб.

В корневом шве при РД-сварке микроструктура ферритно-бейнитная (рис. 2, б) с соотношением феррита и бейнита 62 : 38 %. Сталь X65 микролегирована ниобием, а ниобий в твердом растворе снижает температуру  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, что способствует образованию бейнита и снижению пластичности стали. Когда превращение происходит при температурах в интервале примерно от 200 до 370 °С, бейнит имеет игольчатую структуру с мельчайшими карбидными частицами, расположенными в объеме ферритных пластин (см. рис. 2, б), и называется нижним бейнитом. Сварка корня шва ведется на подъем, т.е. жидкий металл под действием собственного веса вытекает из-под дуги в заднюю часть ванны, вследствие чего глубина провара уменьшается, а силу сварочного тока устанавливают 90 А (согласно табл. 1), это приводит к уменьшению погонной энергии до значений  $< 39$  кДж/см

и увеличению скорости охлаждения сварного соединения, а значит, образованию закалочных микроструктур в металле шва.

Бейнитное превращение, называемое также промежуточным, происходит тогда, когда самодиффузия железа и диффузия легирующих элементов практически отсутствуют, а диффузия углерода еще достаточно существенна.

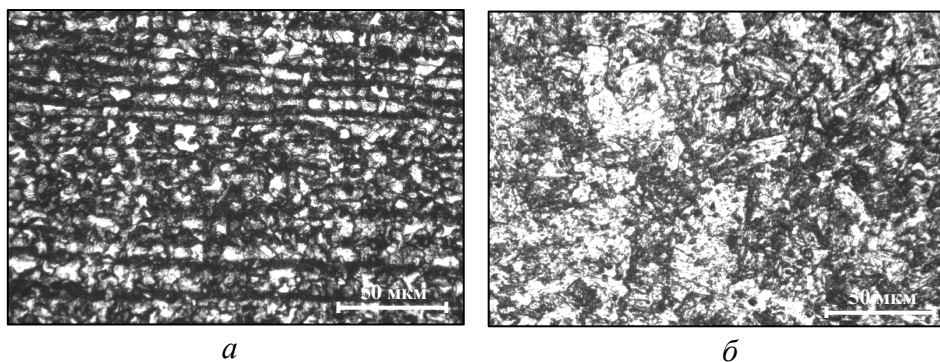


Рис. 2. Микроструктура микролегированной грубой стали X65:  
*a* – основной металл; *б* – корень шва при РД-сварке

Бейнитное превращение сочетает элементы перлитного и мартенситного превращений. Ему предшествует диффузионное перераспределение углерода в аустените, в результате чего образуются участки, обедненные и обогащенные углеродом [4, 11, 12]. При образовании бейнита из-за меньшей подвижности углерода ферритная фаза в большей степени пересыщена углеродом, поэтому карбиды выделяются главным образом внутри ферритной фазы сразу после ее образования, подобно отпуску мартенсита. По этой причине иногда бейнит по структуре и свойствам считают аналогичным отпущенному мартенситу.

В заполняющих слоях сварного шва при сварке самозащитной порошковой проволокой (МПС) наблюдается следующее: в ферритной основе обнаружены иглы мартенсита, шов имеет ферритно-бейнитную (участками мартенситную) структуру (рис. 3) с соотношением феррита – бейнита + мартенсита 70...74 : 30...36 %. Образование этой фазы, возможно, связано с дендритной ликвацией легирующих элементов (марганца и кремния) при скоростном охлаждении при сварке и снижением погонной энергии до значений <math><43 \text{ кДж/см}</math> при скорости подачи сварочной проволоки 200 см/мин и напряжении  $\approx 18 \text{ В}$ .

В облицовочном слое сварного шва характер структурообразования меняется и наблюдается наличие ферритно-перлитной структуры с соотношением  $\approx 70 : 30 \%$ .

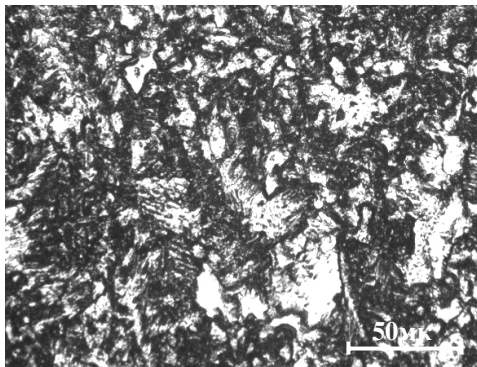


Рис. 3. Микроструктура заполняющих слоев стали X65 при сварке технологией МПС

Необходимо отметить, что соотношение структурных составляющих по сечению вдоль шва меняется незначительно. Однако четко прослеживается изменение фазового состава.

Зона термического влияния образована зернами феррита и перлита, карбидами, расположенными преимущественно по границе зерен (рис. 4).

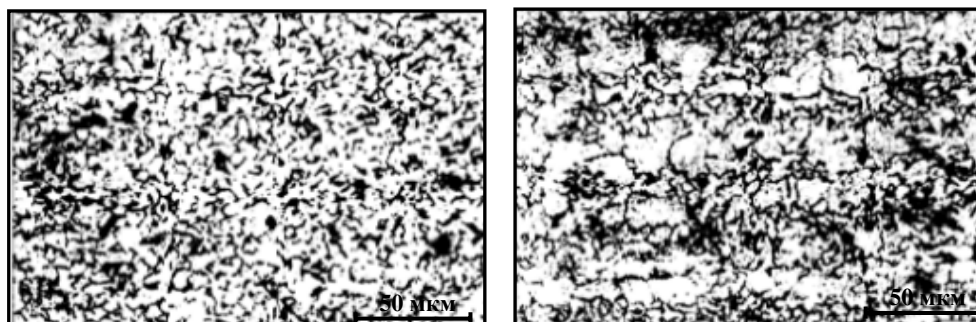


Рис. 4. Микроструктура зоны термического влияния

Структурная микронеоднородность образуется в результате того, что в зерне аустенита, как первичной структуре, возникает громадное количество мелких кристаллитов мартенсита, разделенных поверхностью раздела. Каждый кристаллит мартенсита состоит из блоков, размер которых значительно меньше, чем в исходном аустените. Границы

блоков мартенсита, имеющие линейные размеры порядка 200–300 мкм, образуют микронеоднородность.

Механическую микронеоднородность оценивали по твердости [13, 14]. На рис. 5 показано изменение твердости по сечению шва (замер твердости проводился вдоль шва по направлению корень шва – заполнение и облицовка). В корне шва твердость в среднем составляет 188 HV, а в заполняющих слоях повышается (среднее значение 199 HV) благодаря наличию ферритно-бейнитной (участками мартенситной) структуры, которая увеличивает хрупкость и твердость металла шва, потому как твердость материала напрямую зависит от его структуры.

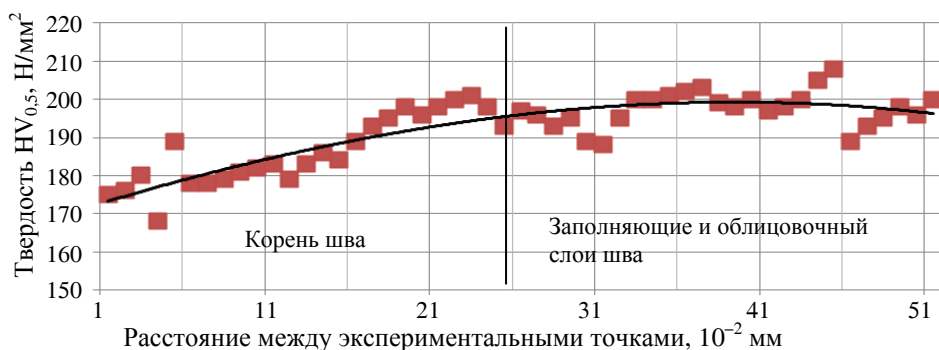


Рис. 5. Твердость сварных швов стали X65, технология сварки РД + МПС

Толщина мартенситных пластин составляет 0,001–0,1 мм. На таком отрезке может уместиться от 30 до 5000 блоков кристалла мартенсита. Поверхности раздела мартенсита и особенно границы блоков представляют собой труднопреодолимые препятствия для движения дислокаций. Всё это и определяет высокую твердость стали, имеющей мартенситную структуру. Хрупкость мартенсита, вероятно, связана с образованием атмосфер из атомов углерода [4].

Определен характер изменения твердости в поперечном направлении сварного соединения основной металл – зона термического влияния – сварной шов – зона термического влияния – основной металл (рис. 6). При сварке данной технологией уровень твердости металла шва и зоны термического влияния составляет 182–208 HV, это на 5–15 единиц выше уровня твердости основного металла стали X65, что обеспечивает надежность и равнопрочность сварного шва с основным металлом [15].



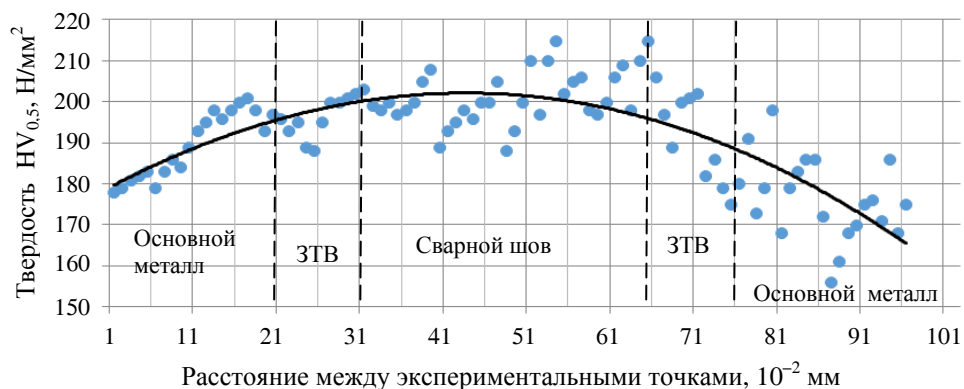


Рис. 6. Характер изменения твердости в поперечном направлении сварного соединения

Механическая микронеоднородность приводит к неравномерному распределению в сварном соединении таких механических свойств металла, как предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, твердость и др. Твердость материала зависит от его кристаллической структуры и связана с многими механическими и физическими характеристиками.

Таким образом, установлено, что причиной повышения твердости, а значит, снижения вязкости и пластичности металла шва служит формирование бейнитно-мартенситной структуры.

### Заключение

Для сварных соединений характерно различие механических свойств и микроструктуры металла на разных участках, соизмеримых с размерами соединения, называемое механической и структурной микронеоднородностью. Выявлена закономерность структурной и механической микронеоднородности в сварных швах. К шву примыкает ряд зон, свойства и протяженность которых зависят от исходного структурного состояния, теплового режима сварки, длительности пребывания металла при высоких температурах и скорости его охлаждения. Установлено, что для сварных соединений из стали Х65 происходит изменение структурно-фазового состава швов и твердости. Твердость, как механическое свойство, в данном случае играет значительную роль по характеристикам, влияющим на работоспособность сварного соединения конструкции, в том числе ответственного назна-

чения. Сварной шов должен обеспечивать равнопрочность с основным металлом. Сварной шов стали Х65 в заполняющих слоях имеет ферритно-бейнитную (участками мартенситную) структуру, которая отличается от других частей сварного шва; твердость в этой зоне повышается. Однако в целом уровень твердости металла шва и зоны термического влияния на 5–15 единиц выше уровня твердости основного металла стали Х65, что обеспечивает надежность и равнопрочность сварного шва с основным металлом.

*Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № 11.1196.2014/К Министерства образования и науки РФ от 17.07.2014.*

### **Список литературы**

1. Лахтин Ю.М. Материаловедение: учебник для высш. техн. учеб. заведений. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
2. Хисамов Р.С., Газизов А.А., Газизов А.Ш. Увеличение охвата продуктивных пластов воздействием / Всерос. науч.-исслед. ин-т организации, управления и экономики нефтегаз. промышленности. – М., 2003. – 568 с.
3. Ушаков В.Г., Филатов В.И., Ибрагимов Х.М. Выбор марки стали и режима термической обработки деталей машин. – Челябинск: Изд-во Юж.-Урал. гос. ун-та, 2001. – 23 с.
4. Циммерман Р., Гюнтер К. Металлургия и материаловедение: справочник. – М.: Metallurgia, 1982. – 477 с.
5. Ершов Г.С., Позняк Л.А. Микронеоднородность металлов и сплавов. – М.: Metallurgia, 1985. – 214 с.
6. Технология и оборудование сварки плавлением: лаборат. практикум / В.П. Сидоров [и др.]; под ред. В.П. Сидорова и К.В. Мотрина. – 2-е изд.; Тольят. гос. ун-т. – Тольятти, 2008. – 364 с.
7. Федосеева Е.М., Игнатов М.Н., Летягин И.Ю. Влияние повторного термического цикла сварки на образование неметаллических включений в многослойных сварных швах трубных сталей // Сварка и Диагностика. – 2011. – № 2. – С. 18–21.
8. Новые материалы / под науч. ред. Ю.С. Карабасова. – М.: Изд-во МИСИС, 2002. – 738 с.

9. Матросов Ю.И., Литвиненко Д.А., Голованенко С.А. Сталь для магистральных трубопроводов. – М.: Metallurgiya, 1989. – 288 с.

10. Вашуль Х. Практическая металлография. Методы изготовления образцов: пер. с нем. – М.: Metallurgiya, 1988. – 320 с.

11. Энциклопедический словарь по металлургии / под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Интермет-Инжиниринг, 2000. – Т. 1, 2. – 832 с.

12. Термическая обработка в машиностроении: справочник / под ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштадта. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.

13. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов: учебник для вузов. – М.: Metallurgiya, 1983. – 352 с.

14. Хромченко Ф.А. Ресурс сварных соединений паропроводов. – М.: Машиностроение, 2002. – 352 с.

15. Федосеева Е.М., Язовских В.М. Свойства и структурообразование в сварных швах при сварке стали X65 по разным технологиям // Metallurg. – 2016. – № 1. – С. 65–70.

### **References**

1. Lakhtin Iu.M. Materialovedenie [Materials science]. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 528 p.

2. Khisamov R.S., Gazizov A.A., Gazizov A.Sh. Uvelichenie okhvata produktivnykh plastov vozdeistviem [Increase in coverage of productive layers influence]. Moscow: Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut organizatsii, upravleniia i ekonomiki neftegazovoi promyshlennosti, 2003. 568 p.

3. Ushakov V.G., Filatov V.I., Ibragimov Kh.M. Vybora marki stali i rezhima termicheskoi obrabotki detalei mashin [The choice of brand became also the mode of heat treatment of details of cars]. Cheliabinsk: Iuzhnoural'skii gosudarstvennyi universitet, 2001. 23 p.

4. Tsimmerman R., Giunter K. Metallurgiya i materialovedenie [Metallurgy and materials science]. Moscow: Metallurgiya, 1982. 477 p.

5. Ershov G.S., Pozniak L.A. Mikroneodnorodnost' metallov i splavov [Microinhomogeneity of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1985. 214 p.

6. Sidorova V.P., Motrina K.V. Tekhnologiya i oborudovanie svarki plavleniem [Technology and equipment of welding by melting]. Tol'iatinskii gosudarstvennyi universitet, 2008. 364 p.

7. Fedoseeva E.M., Ignatov M.N., Letiagin I.Iu. Vliianie povtornogo termicheskogo tsikla svarki na obrazovanie nemetallicheskih vkluchenii v mnogosloinykh svarnykh shvakh trubnykh stalei [Pipe hundred – pour influence of a repeated thermal cycle of welding on formation of nonmetallic inclusions in multilayered welded seams]. *Svarka i Diagnostika*, 2011, no. 2, pp. 18-21.

8. Karabasova Iu.S. Novye materialy [New materials]. Moskovskii institut stali i splavov, 2002. 738 p.

9. Matrosov Iu.I., Litvinenko D.A., Golovanenko S.A. Stal' dlia magistral'nykh truboprovodov [Steel for the main pipelines]. Moscow: Metallurgiya, 1989. 288 p.

10. Vashul' Kh. Prakticheskaja metallografiia. Metody izgotovleniia obraztsov [Practical metallography. Methods of production of samples]. Moscow: Metallurgiya, 1988. 320 p.

11. Entsiklopedicheskii slovar' po metallurgii [The encyclopedic dictionary on metallurgy]. Ed. by N.P. Liakisheva. Moscow: Intermet-Inzhiniring, 2000. Vol. 1, 2. 832 p.

12. Termicheskaja obrabotka v mashinostroenii [Heat treatment in mechanical engineering]. Eds. Iu.M. Lakhtina, A.G. Rakhshadta. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 783 p.

13. Zolotarevskii V.S. Mekhanicheskie svoistva metallov [Mechanical properties of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983. 352 p.

14. Khromchenko F.A. Resurs svarnykh soedinenii paroprovodov [Resource of welded connections of steam lines]. Moscow: Mashinostroenie, 2002. 352 p.

15. Fedoseeva E.M., Iazovskikh V.M. Svoistva i strukturoobrazovanie v svarnykh shvakh pri svarke stali Kh65 po raznym tekhnologiiam [Properties and structurization in *welded* seams when welding X65 steel on different technologies]. *Metallurg*, 2016, no. 1, pp. 65-70.

Получено 22.03.2016

### **Об авторе**

**Федосеева Елена Михайловна** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального

исследовательского политехнического университета; e-mail:  
Elena.fedoseeva.79@mail.ru.

### **About author**

**Elena M. Fedoseeva** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production and Structural Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: Elena.fedoseeva.79@mail.ru.