

УДК 669.15

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ТРУБЫ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ В ШЕСТИГРАННУЮ ИЗ СТАЛИ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ БОРА*

Кадач М.В., аспирант кафедры технологии и оборудования трубного производства (stendek89@yandex.ru)

Гамин Ю.В., аспирант кафедры технологии и оборудования трубного производства

Солонин А.Н., к.т.н., зав. кафедрой металловедения цветных металлов

Поздняков А.В., к.т.н., доцент кафедры металловедения цветных металлов

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Получена шестигранная труба из стали с повышенным содержанием бора, которая является конструкционным материалом для изготовления стеллажей хранения отработавшего ядерного топлива. Показано, что сталь имеет вполне удовлетворительную технологическую пластичность для профилирования прокаткой (волочением) трубы круглого сечения в шестигранную как при повышенной, так и при комнатной температуре.

Ключевые слова: профилирование труб, волочение, холодная деформация, шестигранные трубы, калибрование труб, борсодержащая сталь.

В настоящее время коррозионностойкие борсодержащие стали являются наиболее часто применяемыми конструкционными материалами для изготовления стеллажей хранения отработавшего ядерного топлива. В связи с их высокой стоимостью обязательным условием производства является снижение брака на всех этапах передела, особенно при обработке давлением, путем оптимизации технологических параметров. Большое количество работ [1 – 6] посвящено горячей деформации нержавеющей хромсодержащих сталей. Однако лишь в последние годы проявился интерес к исследованию горячей деформации, микроструктуры борсодержащих коррозионностойких сталей [7 – 12] и совершенствованию технологий получения из них шестигранных труб [13 – 16].

Конечным этапом производства стеллажей для хранения ядерного топлива является профилирование и калибровка на прокатном стане шестигранных труб. Профилирование в основном осуществляется при повышенных температурах (теплая деформация). Из-за большого количества в структуре стали боридов, она обладает хорошей прочностью и твердостью [17, 18], но низким уровнем пластичности как при комнатной, так и при повышенных температурах [19]. Данная работа направлена на моделирование процесса профилирования шестигранных труб с целью улучшения технологических особенностей процесса при различных температурах.

На стадии разработки технического проекта стана для профилирования и калибрования шестигранных

труб были определены и реализованы режимы обжатия исходной трубы диаметром 280 мм с толщиной стенки 6 мм в шестигранную трубу под ключ 255 мм со стенкой 6 мм (табл. 1) с распределением деформации по проходам.

В качестве исходных заготовок для моделирования процесса профилирования шестигранных труб использовали прутки диаметром 60 мм из стали ЧС82, изготовленные ковкой слитков электрошлакового переплава. Заготовки нагревали в электрической камерной печи до температуры 1160 °С и прошивали на стане МИСиС-130Д в гильзы диаметром 61 мм со стенкой 8 мм.

Технические характеристики двухвалкового стана винтовой прокатки МИСиС-130Д приведены ниже:

Рабочие валки:	
диаметр в пережиме, мм	430
длина бочки, мм	320
частота вращения, мин ⁻¹	57/114
угол раскатки, град	0
угол подачи, град	9 – 24
Направляющий инструмент	Линейки
Главный привод:	
тип	Индивидуальный
мощность электродвигателя, кВт	2×200
крутящий момент на одном валке, кН·м	25
Тип выходной стороны	С боковой выдачей гильз
Осевое усилие на оправку, кН	До 300
Заготовка:	
диаметр, мм	30 – 120
длина, мм	80 – 800

Процесс профилирования осуществляли на мини-стане дуо/кварто-100/80. Технические характеристики министана представлены ниже:

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по реализации комплексного проекта создания высокотехнологичного производства по теме: «Создание современного производства стеллажей хранения тепловыделяющих сборок с использованием стали с повышенным содержанием бора».

Таблица 1

Распределение обжатий по роликовым обоймам при профилировании и калибровании шестигранных труб из исходной трубы диаметром 280 мм

Параметр	Номер роликовой обоймы			
	1	2	3	4
Обжатие по диаметру, мм	8	10	6	3
Размер калибра под ключ, мм	272	262	256	253
Относительное обжатие, %	2,85	3,67	2,29	1,17
Диаметр ролика, мм*	328	338	344	347

* Идеальный диаметр ролика – 600 мм.

Размеры исходной заготовки, мм	
Круг:	
диаметр	7 – 15
Полоса:	
толщина	0,5 – 10
ширина	До 60
Размеры готового проката, мм	
Круг:	
диаметр	5 – 7
Лента:	
толщина	До 0,05
Мощность главного привода, кВт	15
Частота вращения рабочих валков, об/мин	0 – 120
Диаметр валков, мм:	
дуо	100
кварто:	
рабочие	43
опорные	70
Масса министана, т	1,5

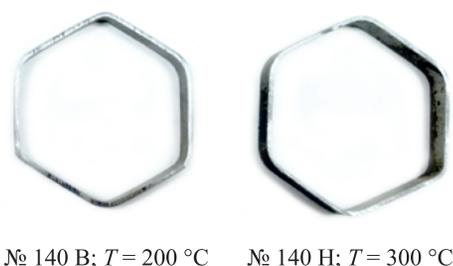
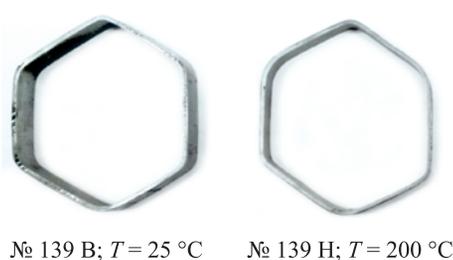
Профилирование образцов выполняли путем многопроходной прокатки в калибре, образованном гладкими валками и профилированными линейками с обжатиями, соответствующими обжатиям в шестиролковых обоймах проектируемого стана. Обжатие по диаметру за один проход при расстояниях между валками 57,3; 55,5; 54 и 52 мм составляло 1,7; 2,2; 1,5 и 2 мм соответственно.

Внешний вид гильзы, полученной прошивкой при 1160 °С исходного прутка диаметром 60 мм, представлен на рис. 1, а. Процесс прошивки протекал стабильно, дефектов на внутренней и наружной поверхности визуально обнаружено не было. Разностенность гильз не превышала 5 %.

Из полученных гильз были изготовлены четыре трубы-образца для последующего профилирования на лабораторном министане дуо/кварто-100/80. Диаметр образцов составил 59 мм, толщина стенки – 1,4 мм, длина – 200 мм. Масштабный коэффициент данного моделирования – 4,7.

Ввиду наличия эффекта распружинивания были произведены прокатки в холодном (25 °С) и теплом (200 и 300 °С) состояниях. После проходов были выполнены замеры внешнего размера трубы («размер под ключ»), результаты которых приведены в табл. 2. Прогиб граней внутрь или отклонение их от прямолинейной формы незначительны и можно предположить, что наличие внутри трубы оправки, что предусмотрено в проектируемом стане, позволит придать трубе правильную шестигранную форму. На рис. 1, б, в представлены полученная шестигранная труба и темплеты, вырезанные из образцов, профилированных при разных температурах.

Структура стали в исходном состоянии представляет собой смесь двух типов боридов: TiB₂ (темные частицы) и (Fe, Cr)₂B (светлые частицы) в ферритной матрице (рис. 2, а). После прошивки и профилирова-



6

Рис. 1. Заготовка после прошивки (а), спрофилированная труба (б) и темплеты образцов шестигранных труб (в) из стали ЧС-82

ния микроструктура качественно не изменяется, происходит незначительное измельчение боридов титана от 10 ± 3 до 5 ± 2 мкм (рис. 2, б), связанное с достаточно высокой степенью деформации, накопленной при прошивке и профилировании.

Выводы. Качественный визуальный анализ полученных тонкостенных труб из стали ЧС82 показал, что процесс прокатки с двусторонним обжатием по диаметру со степенями 1 – 4 % протекает стабильно в исследованном температурном интервале 25, 200 и 300 °С.

Прогиб граней внутрь или отклонение их от прямолинейной формы незначительно и можно предположить, что наличие внутри трубы оправки, что предусмотрено в проектируемом стане, позволит придать трубе правильную шестигранную форму.

Таблица 2

Результаты замеров заготовки после прокатки («размер под ключ»)

Образец	Температура, °С	Номер прохода			
		1	2	3	4
139 В	25	–	–	–	–
139 Н	200	58	56,5	56,2	53
140 В	200	57,7	56,6	56	53,2
140 Н	300	57,5	56,5	55,8	53

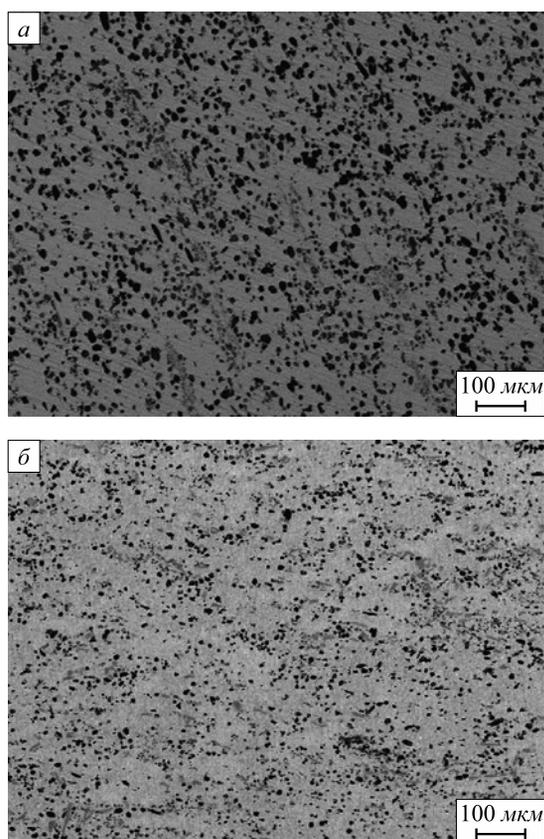


Рис. 2. Микроструктура стали в исходном (а) и спрофилированном (б) состояниях

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Cardoso P.H.S., Kwietniewski C., Porto J.P. etc. The influence of delta ferrite in the AISI 416 stainless steel hot workability // Mater. Sci. and Eng. 2003. Vol. 351. P. 1 – 8.
- Liou H., Pan Y., Hsieh R., Tsai W. Effects of Alloying Elements on the Mechanical Properties and Corrosion Behaviors of 2205 Duplex Stainless Steels // JMEPEG. 2001. Vol. 10. P. 231 – 241.
- Xiao Y., Guo C. Constitutive modelling for high temperature behavior of 1Cr12Ni3Mo2VNbNmartensitic steel // Mater. Sci. and Eng. A. 2011. Vol. 528. P. 5081 – 5087.
- Cabrera J.M., Mateo A., Llanes L. etc. Hot deformation of duplex stainless steels // J. of Mater. Proc. Tech. 2003. Vol. 143 – 144. P. 321 – 325.
- Sivaprasad P.V., Venugopal S., Venugopal S. etc. Validation of processing maps for a 15Cr–15Ni–2.2Mo–0.3Ti austenitic stainless steel using hot forging and rolling tests// J. of Mater. Proc. Tech. 2003. Vol. 132. P. 262 – 268.
- Fang Y.L., Liu Z.Y., Song H.M., Jiang L.Z. Hot deformation behavior of a new austenite–ferrite duplex stainless steel containing high content of nitrogen // Mater. Sci. and Eng. A. 2009. Vol. 526. P. 128 – 133.
- Shulga A.V. A comparative study of the mechanical properties and the behavior of carbon and boron in stainless steel cladding tubes fabricated by PM HIP and traditional technologies // J. of Nuc. Mater. 2013. Vol. 434. P. 133 – 140.
- Mejía I., Bedolla-Jacuinde A., Maldonado C., Cabrera J.M. Determination of the critical conditions for the initiation of dynamic recrystallization in boron microalloyed steels // Mater. Sci. and Eng. A. 2011. Vol. 528. P. 4133 – 4140.
- Поздняков А.В., Чурюмов А.Ю., Царьков А.А. и др. Влияние соотношения Ti/B на микроструктуру и твердость стали с высоким содержанием бора. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 1. С. 43 – 45.
- Чурюмов А.Ю., Хомутов М.Г., Поздняков А.В., Муханов Е.Л. Исследование структуры и механических свойств при высоких температурах стали с повышенным содержанием бора. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 6. С. 53 – 55.
- Чурюмов А.Ю., Хомутов М.Г., Царьков А.А. и др. Исследование структуры и механических свойств при повышенных температурах коррозионностойкой стали с высоким содержанием бора. // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115. № 8. С. 1 – 5.
- Чурюмов А.Ю., Хомутов М.Г., Солонин А.Н. и др. Сравнительный анализ моделей напряжения течения коррозионностойкой стали с высоким содержанием бора, основанных на уравнении типа Аррениуса и искусственных нейронных сетях // Металлы. 2014. № 4. С. 30 – 34.
- Сафьянов А.В., Бураков А.П., Осадчий В.Я. и др. Пути снижения расхода металла при производстве шестигранных труб размером 257×6×4300 мм из борсодержащей стали для хранения отработанного ядерного топлива. // Производство проката. 2014. № 8. С. 18 – 25.
- Федоров А.А., Комаров А.В., Сафьянов А.В. Разработка инновационной технологии и освоение массового производства шестигранных труб из стали ЧС 82 для хранения отработанного ядерного топлива. // Производство проката. 2009. № 3. С. 32 – 37.
- Сафьянов А.В., Федоров А.А., Осадчий В.Я. Пути снижения расхода металла при производстве шестигранных труб-заготовок с размером «под ключ» 250+2,0/-3,0×6+2,0/-1,0×4300+80/-30 мм из борсодержащих марок стали для транспортировки и уплотненного хранения отработанного ядерного топлива. // Сб. докл. XIX Междунар. науч.-технич. конф. «Трубы – 2011». Ч. 2. С. 216 – 224.
- Пат. 2226133 РФ. Способ производства трубных заготовок для изготовления шестигранных чехловых труб из низкопластич-

- ной стали с содержанием бора 1,3 – 1,8 %. / А.А. Федоров, А.В. Сафьянов, В.В. Игнатъев и др. Бюл. № 9. 2004.
17. Pyatakova L.L., Mozharov M.V., Sirotkina M.A., Dyuzheva T.A. Effect of boron on the cold brittleness of medium-carbon steel // *Metal science and Heat Treatment*. 1971. No. 2. P. 62 – 64.
18. Guseinov R.K. Properties of structural steel doped with boron // *Metal science and Heat Treatment*. 1991. No. 7. P. 35 – 37.
19. Zaslavskii A.Ya., Mushtakova T.L. Ductile properties of boron steels for cold die forging // *Metal science and Heat Treatment*. 1992. No. 3. P. 17 – 21.

© 2014 г. Кадач М.В., Гамин Ю.В., Солонин А.Н., Поздняков А.В.

Поступила 9 сентября 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. VOL. 57. NO. 11, pp. 11–14.

PROFILING THE ROUND TUBE INTO THE HEXAGON FROM HIGH BORON CONTENT STEEL

Kadach M.V., Postgraduate of the Chair “Technology and equipment for pipe production” (stendek89@yandex.ru)

Gamin Yu.V., Postgraduate of the Chair “Technology and equipment for pipe production”

Solonin A.N., Cand. Sci. (Eng.), Head of the Chair “Metallography of nonferrous metals”

Pozdnyakov A.V., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallography of nonferrous metals”

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4, Leninskii pr., Moscow, 119049, Russia)

Abstract. Hex tube from steel with a high content of boron, which is a material of construction for the manufacture of racks for storage of spent nuclear fuel, was produced. It has been shown that the steel has a completely satisfactory technological plasticity for profiling rolling (drawing) in a circular tube as in the hexagonal at elevated and at room temperature.

Keywords: pipe profiling, drawing, cold deformation, hexagonal pipes, pipe calibration, boron steel.

REFERENCES

- Cardoso P.H.S., Kwietniewski C., Porto J.P., Reguly A., Strohaecker T.R. The influence of delta ferrite in the AISI 416 stainless steel hot workability. *Mater. Sci. and Eng.* 2003. Vol. 351, pp. 1–8.
- Liou H., Pan Y., Hsieh R., Tsai W. Effects of Alloying Elements on the Mechanical Properties and Corrosion Behaviors of 2205 Duplex Stainless Steels. *JMEPEG*. 2001. Vol. 10, pp. 231–241.
- Xiao Y., Guo C. Constitutive modelling for high temperature behavior of 1Cr12Ni3Mo2VNbN martensitic steel. *Mater. Sci. and Eng. A*. 2011. Vol. 528, pp. 5081–5087.
- Cabrera J.M., Mateo A., Llanes L., Prado J.M., Anglada M. Hot deformation of duplex stainless steels. *J. of Mater. Proc. Tech.* 2003. Vol. 143–144, pp. 321–325.
- Sivaprasad P.V., Venugopal S., Venugopal S., Maduraimuthu V., Vasudevan M., Mannan S.L., Prasad Y.V.R.K., Chaturvedi R.C. Validation of processing maps for a 15Cr–15Ni–2.2Mo–0.3Ti austenitic stainless steel using hot forging and rolling tests. *J. of Mater. Proc. Tech.* 2003. Vol. 132, pp. 262–268.
- Fang Y.L., Liu Z.Y., Song H.M., Jiang L.Z. Hot deformation behavior of a new austenite–ferrite duplex stainless steel containing high content of nitrogen. *Mater. Sci. and Eng. A*. 2009. Vol. 526, pp. 128–133.
- Shulga A.V. A comparative study of the mechanical properties and the behavior of carbon and boron in stainless steel cladding tubes fabricated by PM HIP and traditional technologies. *J. of Nuc. Mater.* 2013. Vol. 434, pp. 133–140.
- Mejia I., Bedolla-Jacuinde A., Maldonado C., Cabrera J.M. Determination of the critical conditions for the initiation of dynamic recrystallization in boron microalloyed steels. *Mater. Sci. and Eng. A*. 2011. Vol. 528, pp. 4133–4140.
- Pozdnyakov A.V., Churyumov A.Yu., Tsar’kov A.A., Bazlov A.I., Solonin A.N. Influence of the ratio Ti/B on the microstructure and the hardness of the steel with a high content of boron. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 1, pp. 43–45. (In Russ.).
- Churyumov A.Yu., Khomutov M.G., Pozdnyakov A.V., Mukhanov E.L. Study of the structure and high-temperature mechanical properties of a steel with an elevated content of boron. *Metal Science and Heat Treatment*, 2014, Oct.5, p. 3.
- Churyumov A.Yu., Khomutov M.G., Tsar’kov A.A., Pozdnyakov A.V., Solonin A. N., Mukhanov E.L. Study of the structure and mechanical properties of corrosion-resistant steel with a high concentration of boron at elevated temperatures. *Physics of Metals and Metallography*, 2014, Vol.115, no. 8, pp. 809–813.
- Churyumov A.Yu., Khomutov M.G., Solonin A.N., Mukhanov E.L., Efimov V.M. Comparative analysis of models of the flow stress of corrosion-resistant steel with a high content of boron, based on the Arrhenius type equation and artificial neural networks. *Metally*, 2014, no. 4, pp. 30–34. (In Russ.).
- Saf’yanov A.V., Burakov A.P., Osadchii V.Ya., Klimov N.P., Matyushin A.Yu., Levshunov M.A. Ways to reduce material consumption in the production of hexagonal pipe size 257×6×4300 mm of boron steel for the storage of spent nuclear fuel. *Proizvodstvo prokata*, 2014, no. 8, pp. 18–25. (In Russ.).
- Fedorov A.A., Komarov A.V., Saf’yanov A.V., Khristenko V.K., Osadchii V.Ya. Development of innovative technologies and the development of mass production of steel pipes of hex ES 82 for storage of spent nuclear fuel. *Proizvodstvo prokata*, 2009, no. 3, pp. 32–37. (In Russ.).
- Saf’yanov A.V., Fedorov A.A., Osadchii V.Ya. *Puti snizheniya raskhoda metalla pri proizvodstve shestigrannykh trub-zagotovok s razmerom «pod klyuch» 250+2,0/-3,0k×6+2,0/-1,0k×4300+80/-30 mm iz borsoderzhashchikh marok stali dlya transportirovki i uplotnennogo khraneniya otrabotannogo yadernogo topliva. Truby – 2011* [Ways to reduce material consumption in the production of pipes, hexagonal pieces with a size of “turnkey” 250 + 2.0 / + 2.0 -3,0×6 / -1,0×4300 + 80 / -30 mm of boron steels for the transportation and compact storage of spent nuclear fuel]. Part. 2. In: *Sb. dokladov XIX mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii* [Reports of XIX International Scientific and Technical Conference “Tubes – 2011”]. pp. 216–224. (In Russ.).
- Fedorov A.A., Saf’yanov A.V., Ignat’ev V.V. etc. *Sposob proizvodstva trubnykh zagotovok dlya izgotovleniya shestigrannykh chekhlovyykh trub iz nizkoplachnoy stali s soderzhaniam bora 1.3–1.8 %* [Process for producing round billets for production of hexagonal shroud tubes of low ductility steel containing 1.3–1.8% of boron]. Patent RF no. 2226133, *Byulleten’ Izobretenii* 2004, no. 9. (In Russ.).
- Pyatakova L.L., Mozharov M.V., Sirotkina M.A., Dyuzheva T.A. Effect of boron on the cold brittleness of medium-carbon steel. *Metal science and Heat Treatment*. 1971, no. 2, pp. 62–64.
- Guseinov R. K. Properties of structural steel doped with boron. *Metal science and Heat Treatment*, 1991, no. 7, pp. 35–37.
- Zaslavskii A.Ya., Mushtakova T.L. Ductile properties of boron steels for cold die forging. *Metal science and Heat Treatment*. 1992, no. 3, pp. 17–21.

Received September 11, 2014