

## ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ

*М.В. Чукин, П.П. Полецков, Д.Ю. Алексеев, Г.А. Бережная, М.С. Гущина*

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск*

Одним из наиболее перспективных направлений развития современного машиностроения является применение высокопрочных сталей при создании продукции, удовлетворяющей всем современным требованиям рынка. Применение таких сталей позволяет снизить металлоемкость изготавливаемых конструкций за счет уменьшения толщины применяемого металла при сохранении прежней конструктивной прочности, увеличить срок службы изделий за счет повышения износостойкости, а также повысить надежность создаваемой продукции. Процесс переработки высокопрочных сталей имеет ряд особенностей, связанных с повышенной чувствительностью таких сталей к тепловому воздействию. Целью данной работы является исследование влияния плазменной резки на микроструктуру и твердость в зоне термического влияния высокопрочной стали твердостью 500 HBW. Для этого проведены исследования микроструктуры в зоне термического влияния плазменной резки высокопрочной листовой стали твердостью 500 HBW. Результаты исследований показали наличие в зоне термического влияния участков с различной структурой и свойствами: обезуглероженный участок, участок закалки, участок неполной закалки, участок отпуска, основной металл. По мере удаления от границы реза скорость охлаждения и температура металла снижаются, что приводит к понижению твердости стали. Микроструктура основного металла имеет игольчатый вид и состоит из реек разной ориентации и размеров. Структура отдельных участков зоны термического влияния: участка закалки – мартенсит, участка неполной закалки – мартенсит + феррит, участка отпуска – мартенсит отпуска. Также определена общая протяженность зоны термического влияния и длина отдельных ее участков.

*Ключевые слова: высокопрочная сталь; плазменная резка; микроструктура; твердость; зона термического влияния.*

### Введение

Одним из наиболее перспективных направлений развития современного машиностроения является применение высокопрочных сталей при создании продукции, удовлетворяющей всем современным требованиям рынка [1, 2].

Применение таких сталей позволяет снизить металлоемкость изготавливаемых конструкций за счет уменьшения толщины применяемого металла при сохранении прежней конструктивной прочности, увеличить срок службы изделий за счет повышения износостойкости, а также повысить надежность создаваемой продукции [3].

Процесс переработки высокопрочных сталей имеет ряд особенностей, связанных с повышенной чувствительностью таких сталей к тепловому воздействию. Так, при использо-

вании горячих методов резки, среди которых наибольшее распространение получил плазменный способ, в металле образуется участок с изменившимися структурой и свойствами – зона термического влияния [4]. Протяженность данной зоны зависит от ряда параметров: физических свойств и толщины разрезаемого металла, а также от режимов плазменной резки [5]. Чем меньше протяженность зоны термического влияния, тем выше технологичность металла в последующих операциях.

В зоне термического влияния низколегированных сталей выделяют три участка (рис. 1): закалки, неполной закалки и отпуска [6]. При этом характер изменения твердости в данной зоне имеет нелинейную зависимость (рис. 2) [7].

Целью данной работы является исследование влияния плазменной резки на микро-

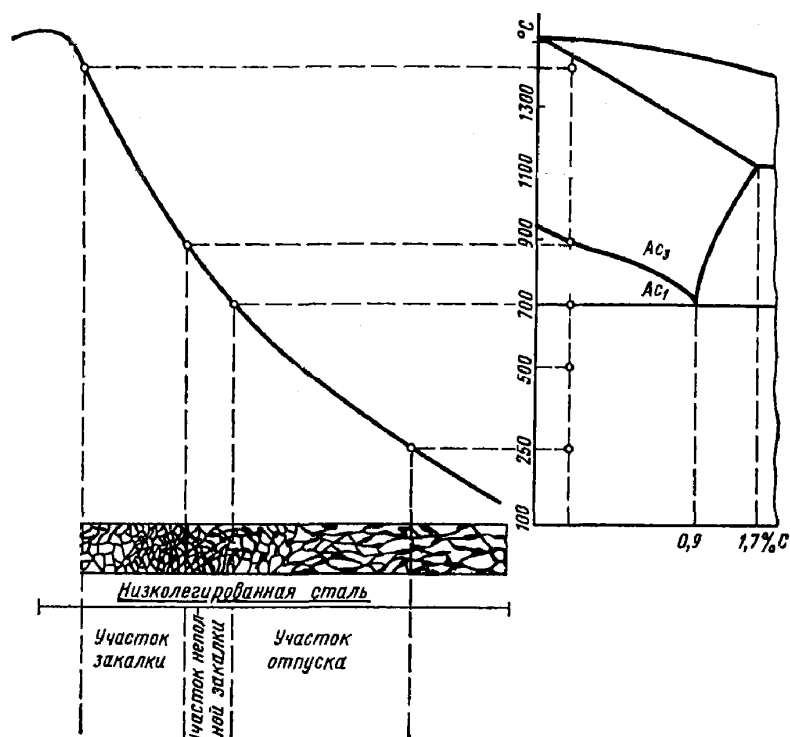


Рис. 1. Строение зоны термического влияния низколегированных сталей



Рис. 2. Распределение твердости в зоне термического влияния низколегированных сталей: 1 – участок закалки; 2 – участок неполной закалки; 3 – участок отпуска; 4 – основной металл, не затронутый нагревом при резке

Характеристики исследуемой стали

Таблица 1

№	Механические свойства						Температура закалки, °С	h, мм	Режимы плазменной резки	
	НВW	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{B}$ , Н/мм <sup>2</sup>	A <sub>5</sub> , %	KCV <sup>-20</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	CEV, %			I, А	V, мм/мин
	не менее или в пределах									
1	477–	1200	1450	8	20	0,65	960	8	130	1500
2	540									700

структуру и твердость в зоне термического влияния высокопрочной стали твердостью 500 НВW (табл. 1). В работе принимали участие: ООО «Термодеформ-МГТУ» [8], ЦКП НИИ Наносталей и ООО «Научно-техническая производственная фирма «Эталон».

#### Методика проведения исследований

Для проведения исследований была произведена плазменная резка высокопрочной листовой стали твердостью 500 НВW толщиной 8 и 20 мм. Затем от металла после плазменной резки были отобраны образцы для

## Металловедение и термическая обработка

проведения металлографического анализа (рис. 3). Для микроанализа из образцов по стандартной методике были приготовлены поперечные микрошлифы [9, 10]. Для выявления микроструктуры поверхность шлифа подвергалась травлению в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте методом погружения полированной поверхности в ванну с реактивом.

Общий вид микроструктуры образцов после травления представлен на рис. 4.

Измерение микротвердости проводилось в соответствии с ГОСТ 9450–60. Первое измерение проводилось на расстоянии 50 мкм от границы реза, последующие измерения производились через каждые 250 мкм по длине образца (рис. 5).

### Результаты исследований

Результаты исследований показали наличие в зоне термического влияния участков с различной структурой и свойствами (табл. 2, 3).

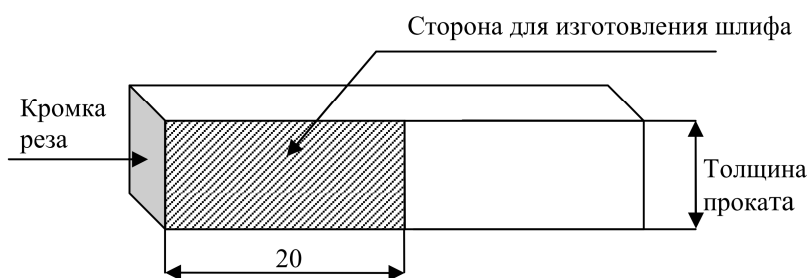
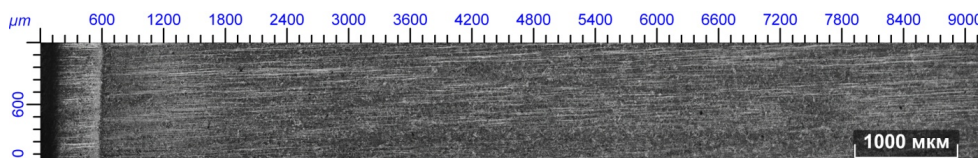
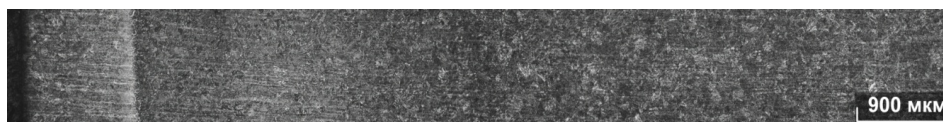


Рис. 3. Схема отбора образцов

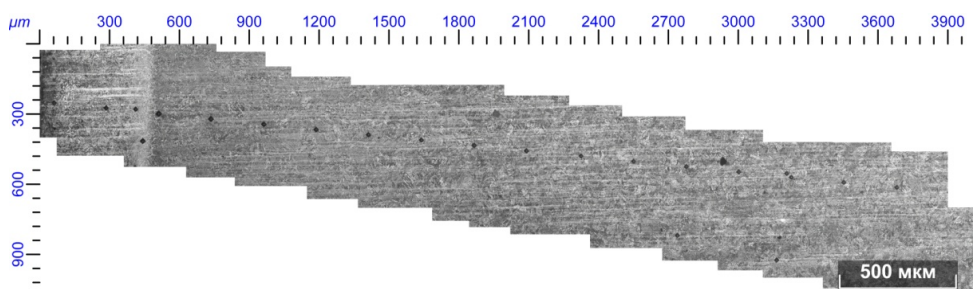


а)

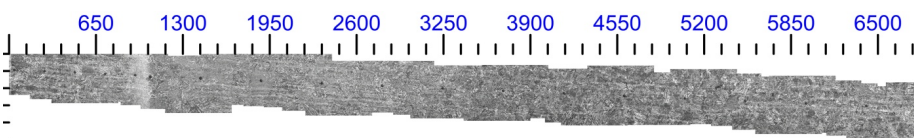


б)

Рис. 4. Общий вид микроструктуры высокопрочной стали твердостью 500 HBW в зоне термического влияния: а – прокат толщиной 8 мм; б – прокат толщиной 20 мм



а)

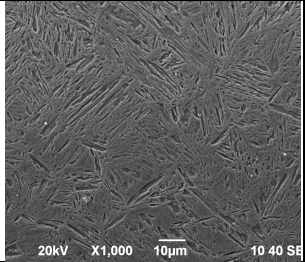
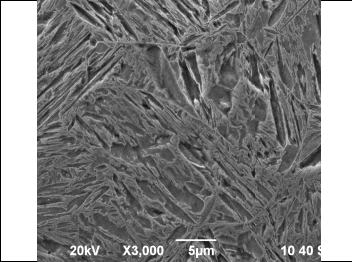
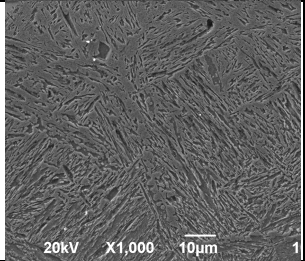
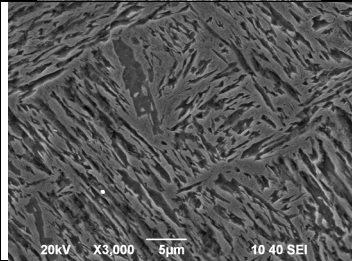
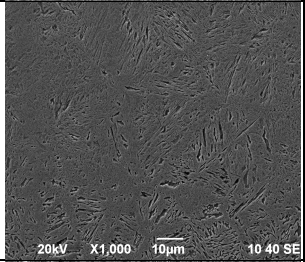
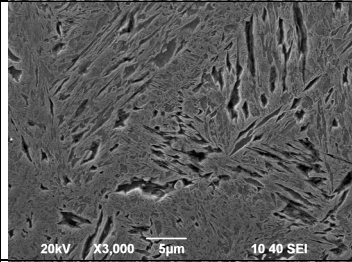
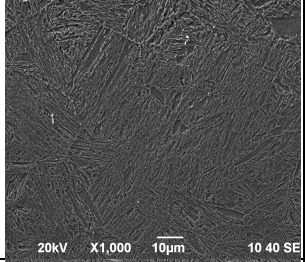
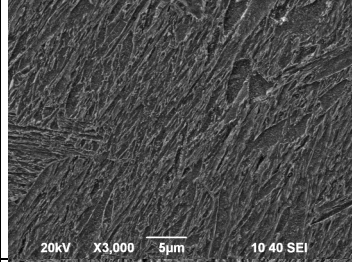
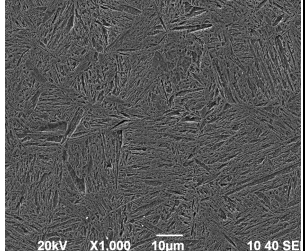
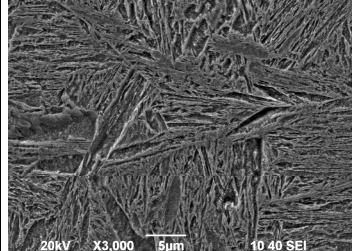


б)

Рис. 5. Микроструктура листовой стали с отпечатками при замере твердости в зоне термического влияния плазменной резки: а – прокат толщиной 8 мм; б – прокат толщиной 20 мм

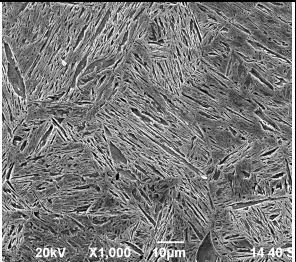
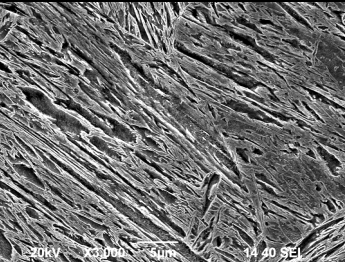
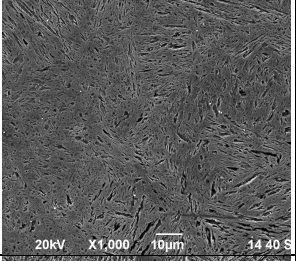
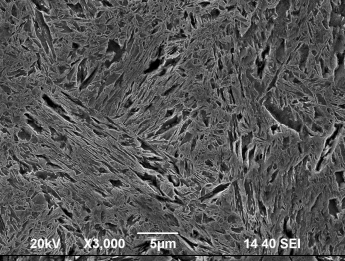
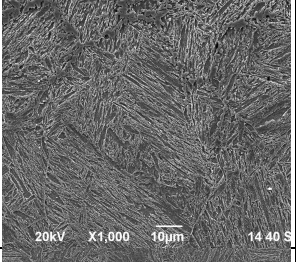
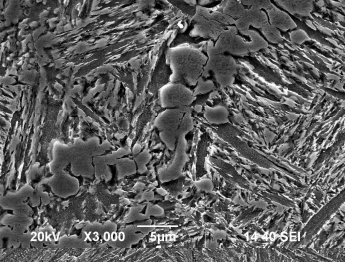
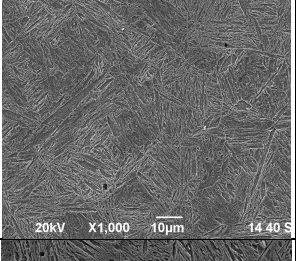
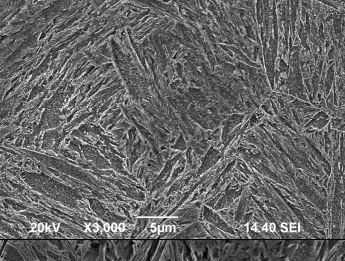
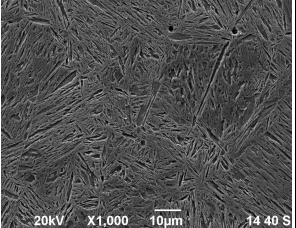
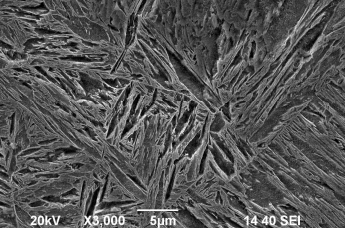
Таблица 2

Микроструктура участков зоны термического влияния плазменной резки  
высокопрочной стали толщиной 8 мм

Участок зоны тер- мического влияния	Расстоя- ние от кромки реза, мм	Твердость, HV <sub>0,2</sub> (нормируе- мая твердость 4770–5400)	Микроструктура, РЭМ		Микро- структура участка зоны терми- ческого влияния
			×1000	×3000	
Обезугле- роженный участок	0,05	1919			Мартенсит низкоугле- родистый + феррит
Участок закалки	0,33	4708			Мартенсит
Участок неполной закалки	0,46	3737			Мартенсит + феррит
Участок отпуска	0,55	3382			Мартенсит отпущенный
Участок основного металла	3,05	4945			Мартенсит



Микроструктура участков зоны термического влияния плазменной резки высокопрочной стали толщиной 20 мм

Участок зоны термического влияния	Расстояние от кромки реза, мм	Твердость, $HV_{0,2}$ (нормируемая твердость 4770–5400)	Микроструктура, РЭМ		Микроструктура участка зоны термического влияния
			×1000	×3000	
Участок закалки	0,05	4837			Мартенсит
Участок закалки	0,55	5558			Мартенсит
Участок неполной закалки	1,05	5015			Мартенсит + феррит
Участок отпуска	1,175	3603			Мартенсит отпуска
Участок основного металла	6,09	5528			Мартенсит

– *Обезуглероженный участок* наблюдается в исследуемой высокопрочной стали толщиной 8 мм на расстоянии до 0,33 мм от границы реза, микроструктура представляет собой низкоуглеродистый мартенсит и феррит. Микротвердость HV – 1600–1900 МПа.

– *Участок закалки.* Данная область в процессе резки подвергается нагреву до температур выше  $A_{c3}$  и за счет потока режущей струи слои металла охлаждаются с высокой скоростью, достаточной для образования закалочной структуры – мартенсита. Длина участка 0,13–1,05 мм. Микротвердость HV – 4708–5577 МПа.

– *Участок неполной закалки.* По мере удаления от границы реза скорость охлаждения и температура металла снижаются (происходит закалка из межкритического интер-

вала температур  $A_{c1}$ – $A_{c3}$ ). Это приводит к понижению твердости стали. В структуре металла наряду с мартенситом присутствуют зерна феррита. Длина участка – 0,1–0,13 мм. Микротвердость HV – 3737–5015 МПа.

– *Участок отпуска.* На данном участке металл нагревается до температур  $A_{c1}$ . В результате высокого отпуска наблюдается разупрочнение стали до минимальных значений HV – 3382–3603 МПа. Далее по мере удаления от границы реза и снижения температурного воздействия происходит восстановление твердости до значений основного металла HV – 4799–4961 МПа. Структура на данном участке представляет собой отпущенный мартенсит. Длина участка – 2,50–4,92 мм.

– *Основной металл.* Микроструктура основного металла имеет игольчатый вид и со-

Таблица 4

Общая протяженность зоны термического влияния плазменной резки  
и глубина отдельных переходных зон для исследуемой высокопрочной стали твердостью 500 HBW

Толщина проката, мм	Длина участков зоны термического влияния, мм				Общая протяженность зоны термического влияния, мм
	Обезуглероженный участок	Участок закалки	Участок неполной закалки	Участок отпуска	
8	0,33	0,13	0,10	2,50	3,00
20	Не выявлен	1,05	0,13	4,92	6,00

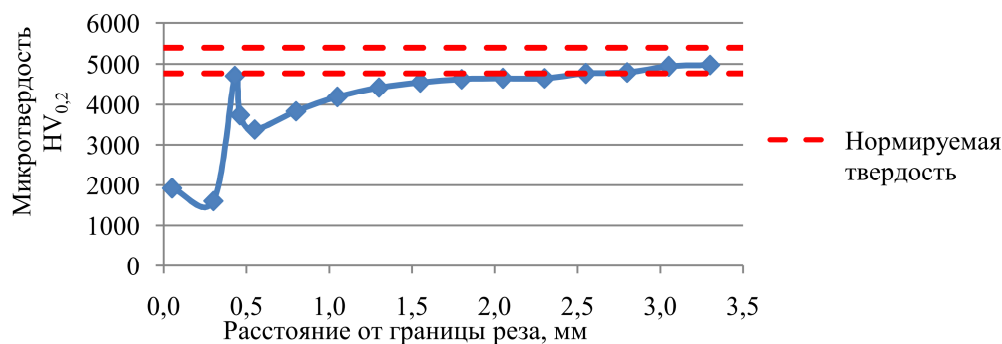


Рис. 6. Твердость в зоне термического влияния плазменной резки высокопрочной стали твердостью 500 HBW толщиной 8 мм

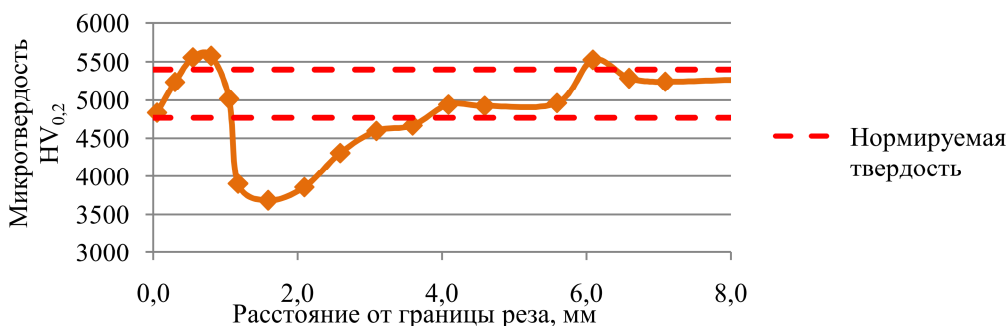


Рис. 7. Твердость в зоне термического влияния плазменной резки высокопрочной стали твердостью 500 HBW толщиной 20 мм

стоит из реек разной ориентации и размеров. Структуру, имеющую подобную морфологию, можно отнести к речному мартенситу. Микротвердость HV – 4945–5528 МПа.

Таким образом, общая протяженность зоны термического влияния плазменной резки для исследуемой высокопрочной стали толщиной 8 мм составляет 3 мм, толщиной 20 мм – 6 мм (табл. 4, рис. 6, 7).

### Выводы

1. Проведено исследование микроструктуры высокопрочного листового проката в зоне термического влияния плазменной резки.

2. Определена структура отдельных участков зоны термического влияния: участка закалки – мартенсит, участка неполной закалки – мартенсит + феррит, участка отпуска – мартенсит отпуска.

3. Определена общая протяженность зоны термического влияния и длина отдельных ее участков.

4. Установлено, что для исследуемой высокопрочной стали твердостью 500 HBW толщиной 8 мм общая протяженность зоны термического влияния равна 3,0 мм, для стали толщиной 20 мм – 6,0 мм.

Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор 02.G25.31.0105).

### Литература

1. Физическое моделирование процессов производства горячекатаного листа с уникальным комплексом свойств / В.М. Салганик, С.В. Денисов, П.П. Полецков и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2014. – № 3. – С. 37–39.

2. Научная деятельность ГОУ ВПО «МГТУ» в условиях развития нанотехнологий / М.В. Чукин, В.М. Колокольцев, Г.С. Гун и др. //

*Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2009. – № 2. – С. 55–59.

3. Основные виды и области применения стратегического высокопрочного листового проката / М.В. Чукин, В.М. Салганик, П.П. Полецков и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2014. – № 4. – С. 41–44.

4. Панов А.А., В.В. Аникин, Н.Г. Бойм. *Обработка металлов резанием*, 1982. – М.: Кудлиц-Пресс. – 736 с.

5. Ширишов, И.Г. *Плазменная резка* / И.Г. Ширишов, В.Н. Котиков. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.

6. *Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки: учеб. для вузов* / А.И. Акулов, В.П. Алехин, С.И. Ермаков и др.; под ред. А.И. Акулова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 560 с.

7. Исследование влияние температуры нагрева при закалке на механические свойства низколегированной высокопрочной стали / В.М. Салганик, П.П. Полецков, Г.А. Бережная и др. // *Производство проката*. – 2015. – С. 32–37.

8. Научно производственный комплекс «Термодеформ» для создания новых технологий / В.М. Салганик, П.П. Полецков, М.О. Артамонова и др. // *Сталь*. – 2014. – № 4. – С. 104–107.

9. Koptseva, N.V. Use of the Thixomet pro software for quantitative analysis of the ultra-fine-grain structure of low- and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing / N.V. Koptseva, M.V. Chukin, O.A. Nikitenko // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2012. – Vol. 54, no. 7–8. – P. 387–392. DOI: 10.1007/s11041-012-9518-z

10. Исследование влияния скорости охлаждения на формирование структуры катанки из стали 80P, предназначенной для производства высокопрочной арматуры / Н.В. Коццева, Д.М. Чукин, Ю.Ю. Ефимова и др. // *Черные металлы*. – 2014. – № 2. – С. 23–31.

**Чукин Михаил Витальевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологий обработки материалов, первый проректор – проректор по научной и инновационной работе, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; m.chukin@mail.ru.

**Полецков Павел Петрович**, д-р техн. наук, профессор кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; pavel\_poletskov@mail.ru.

**Алексеев Даниил Юрьевич**, студент кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; danon369@gmail.com.

**Бережная Галина Андреевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры технологий, сертификации и сервиса автомобилей, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; galina\_1609@mail.ru.

**Гущина Марина Сергеевна**, студент кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; marina.mgn.89@mail.ru.

*Поступила в редакцию 15 августа 2016 г.*

DOI: 10.14529/met160410

## THE INFLUENCE OF PLASMA-ARC CUTTING ON THE MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF HIGH-STRENGTH STEEL

*M.V. Chukin, m.chukin@mail.ru,  
P.P. Poletskov, pavel\_poletskov@mail.ru,  
D.Yu. Alekseev, danon369@gmail.com,  
G.A. Berezhnaya, galina\_1609@mail.ru,  
M.S. Gushchina, marina.mgn.89@mail.ru*

*Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation*

The application of high-strength steels during the creation of products satisfying all the modern requirements of the market is one of the most promising areas of modern engineering. The use of these steels reduces metal consumption of produced constructions due to reducing the thickness of the metal while maintaining the same structural strength, increases the service life of products thanks to increasing durability, as well as improves the reliability of the produced product. The processing of high-strength steel has a number of features associated with increased sensitivity of such steels to a thermal effect. The aim of this study is to research the influence of plasma-arc cutting on the microstructure and hardness in the heat-affected zone of high-strength steel having hardness of 500 HBW. To do that, the research of microstructure in the heat-affected zone of plasma-arc cutting of high-strength steel with 500 HBW hardness was performed. The results of research showed the presence of parts with different structures and properties in the heat-affected zone of plasma-arc cutting: decarburized layer, hardening layer, incomplete quenching layer, tempering layer, and the base metal. While moving off the boundary of the cut the cooling rate and temperature of metal are reduced. It is the cause of lowering steel hardness. The microstructure of the base metal has a needle form, and consists of strips of different orientation and size. The structure of different parts of the heat-affected zone are: hardening layer – martensite, incomplete quenching layer – martensite + ferrite, tempering layer – tempered martensite. The total length of the heat-affected zone and the length of its individual sections were also determined.

*Keywords: high-strength steel; plasma-arc cutting; microstructure; hardness; heat-affected zone.*

## References

1. Salganik V.M., Denisov S.V., Poletskov P.P., Stekanov P.A., Berezhnaya G.A., Alekseev D.Yu. [The Physical Modeling of Hot-Rolled Sheet Production with a Unique Set of Properties]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2014, no. 3, pp. 37–39. (in Russ.)
2. Chukin M.V., Kolokol'tsev V.M., Gun G.S., Salganik V.M., Platov S.I. [The Scientific Activity of Nosov Magnitogorsk State Technical University Under the Conditions of the Development of Nanotechnology]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2009, no. 2, pp. 55–59. (in Russ.)
3. Chukin M.V., Salganik V.M., Poletskov P.P., Denisov S.V., Kuznetsova A.S., Berezhnaya G.A., Gushchina M.S. [Main Types and Applications of Strategic High-Strength Sheet Metal]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2014, no. 4, pp. 41–44. (in Russ.)
4. Panov A.A., Anikin V.V., Boym N.G. *Obrabotka metallov rezaniem* [Metal Machining]. Moscow, Kudits-press Publ., 1982. 736 p.
5. Shirshov I.G., Kotikov V.N. *Plazmennaya rezka* [Plasma-Arc Cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 192 p.
6. Akulov A.I., Alekhin V.P., Ermakov S.I. *Tekhnologiya i oborudovanie svarki plavleniem i termicheskoy rezki* [Technology and Equipment for Fusion Welding and Thermal Cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 560 p.
7. Salganik V.M., Poletskov P.P., Berezhnaya G.A., Gushchina M.S., Alekseev D.Yu. [Study of the Effect of Heating Temperature in Quenching on the Mechanical Properties of Low-Alloy High-Strength Steel]. *Proizvodstvo prokata*, 2015, no. 5, pp. 32–37. (in Russ.)
8. Salganik V.M., Poletskov P.P., Artamonova M.O., Denisov S.V., Chikishev D.N. [Scientific Production Complex “Termodeform” to Create New Technologies]. *Stal'*, 2014, no. 4, pp. 104–107. (in Russ.)
9. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet Pro Software for Quantitative Analysis of the Ultrafine-Grain Structure of Low- and Medium-Carbon Steels Subjected to Equal Channel Angular Pressing. *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 54, no. 7–8, pp. 387–392. DOI: 10.1007/s11041-012-9518-z
10. Koptseva N.V., Chukin D.M., Efimova Yu.Yu., Nikitenko O.A., Ishimov A.S. [Investigation of the Effect of Cooling Rate on the Formation of Structure of 80R Steel Rod Designed for the Production of High-Strength Reinforcement]. *Chernye metally*, 2014, no. 2, pp. 23–31. (in Russ.)

*Received 15 August 2016*

---

## ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Влияние плазменной резки на микроструктуру и твердость высокопрочной стали / М.В. Чукин, П.П. Полецков, Д.Ю. Алексеев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 92–100. DOI: 10.14529/met160410

## FOR CITATION

Chukin M.V., Poletskov P.P., Alekseev D.Yu., Berezhnaya G.A., Gushchina M.S. The Influence of Plasma-Arc Cutting on the Microstructure and Hardness of High-Strength Steel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 92–100. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160410

---