

УДК 621.791.927.5  
DOI:10.30987/2223-4608-2020-10-34-39

**Е.Н. Ерёмин**, д.т.н., **А.С. Лосев**, инженер,  
**И.А. Пономарев**, инженер, **С.А. Бородихин**, инженер  
(Омский государственный технический университет (ОмГТУ),  
644050, г. Омск, Проспект Мира, 11)  
E-mail: weld\_techn@mail.ru

## **Повышение окалиностойкости валков горячей прокатки наплавкой порошковой проволокой\***

*Рассмотрено применение порошковой проволоки ПП30Н8Х6МЗСТЮ, обеспечивающей высокую окалиностойкость наплавленного металла. Установлено, что показатели окалинообразования металла 30Н8Х6МЗСТЮ значительно лучше, чем у стали 30Х2В8Ф при 900 °С. Показано, что основой окалины металла 30Н8Х6МЗСТЮ являются соединения  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ ,  $Cr_2FeO_4$ ,  $Fe_2NiO_4$  и  $Fe_3N$ .*

**Ключевые слова:** наплавка; никельхромомолибденовая сталь; порошковая проволока; окалиностойкость.

**E.N. Eremin**, Dr. Sc. Tech., **A.S. Losev**, Engineer,  
**I.A. Ponomarev**, Engineer, **S.A. Borodikhin**, Engineer  
(Omsk State Technical University (OmskSTU), 11, Mir Avenue, Omsk, 644050)

## **Scale resistance increase in hot rolling rollers by powder wire welding deposition**

*The application of PP30N8H6M3STYu powder wire is considered which ensures high scale-resistance of welded metal. It is defined that the scale formation indices of 30N8H6M3STYu metal are much better than those in 30H2V8F steel at the temperature of 900°C. It is shown that the scale base of 30N8H6M3STYu metal is chemical compounds of  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ ,  $Cr_2FeO_4$ ,  $Fe_2NiO_4$  and  $Fe_3N$ .*

**Keywords:** welding deposition; nickel-chromium-molybdenum steel; powder wire; scale-resistance.

### **Введение**

Объем производства и качество проката во многом зависят от работоспособности прокатных валков горячей прокатки. Значительная часть времени простоев прокатных станов связано с перевалкой валков, вышедших из строя. Эксплуатационная надежность валков горячей прокатки находится в прямой зависи-

мости не только от износостойкости металла, из которого он изготовлен, но и от интенсивности процесса окалинообразования.

При нагреве поверхность металла взаимодействует с кислородом с образованием окалины. В результате чего изменяется химический состав поверхностного слоя металла, и снижаются его эксплуатационные свойства [1].

Окалина обладает абразивными свойствами вследствие своей значительной твердости, которая сохраняется при высоких температу-

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-19-01224).

рах горячей обработки. Наличие обильной окалины в зоне контакта усиливает износ валков. Поэтому проблема повышения долговечности валков, работающих не только в условиях абразивного износа, но и высоких температур, является исключительно важной.

Повысить ресурс работы валков позволяет наплавка рабочих поверхностей износостойкими сталями [2]. На металлургических предприятиях широкое применение находят валки, наплавленные сталью типа 3Х2В8. Увеличение скорости прокатки и производительности станов, роста доли проката из легированных и специальных сталей требует улучшения свойств металла валков. Учитывая это, широкое применение находят процессы нанесения на рабочие поверхности износостойких покрытий из экономнолегированных мартенситостареющих сталей, наплавленных порошковой проволокой.

При этом перспективны дисперсионно-твердеющие стали. Основой многих таких сталей является система Fe-Ni-Cr [3]. Для получения мартенситной матрицы такие стали должны содержать 6...12 %Ni и 6...8 %Cr. В сталях с содержанием никеля и хрома на нижнем пределе для снижения температуры начала мартенситного превращения и упрочнения мартенсита после закалки целесообразно использовать углерод. Его концентрация может достигать до 0,3 %. В этом случае появляется возможность использования карбидно-интерметаллидного упрочнения, для чего в большинстве случаев используется молибден. В тоже время такие стали имеют невысокую степень упрочнения и низкую, вследствие этого, износостойкость [4]. Поэтому они могут быть использованы для изготовления деталей, работающих в условиях умеренного износа.

Более высокий эффект упрочнения сталей может обеспечиваться путем создания различных дисперсных промежуточных фаз. Эффективность упрочнения такими фазами определяется составом и строением выделяющихся частиц, размером и характером распределения в матрице, взаимодействием с ней,

влиянием выделений на структуру. Эти факторы обуславливают более высокие служебные свойства стали. К эффективным фазам, вызывающим значительное упрочнение, относятся карбиды, нитриды титана, алюминия и комплексные соединения на их основе.

В тоже время известно, что для повышения степени упрочнения такой стали и, как следствие износостойкости, можно дополнительно легировать её кремнием [3]. Кремний существенно влияет на уменьшение растворимости в мартенсите молибдена, титана и алюминия, образующих упрочняющие частицы. Усиление эффекта твердения достигается при введении его в состав стали до 2,5...3,0 %. В связи с этим одной из перспективных дисперсионно-твердеющих композиций может быть сталь 30Н8Х6МЗСТЮ, которую можно было бы использовать для наплавки износостойких покрытий порошковой проволокой созданной на её основе.

Проведенными ранее исследованиями стали 30Н8Х6МЗСТЮ установлено, что она в результате старения имеет значительный эффект упрочнения и может быть использована для износостойкой наплавки [5]. Однако особенности работы такой стали при высоких температурах не изучены.

В связи с этим исследовали особенности окалинообразования и изменения структуры и фазового состава стали 30Н8Х6МЗСТЮ в результате воздействия высоких температур в воздушной атмосфере.

### Методика проведения экспериментальных исследований

Объектом исследований являлась литая сталь покрытия, наплавленного порошковой проволокой, созданной на основе стали 30Н8Х6МЗСТЮ. Для обеспечения необходимого содержания углерода в стали в состав порошковой проволоки был введен высокоуглеродистый FeCr. Расчетный состав экспериментальной порошковой проволоки приведен в табл. 1.

#### 1. Расчетный состав экспериментальной порошковой проволоки, %

Ni	FeCr	Mo	FeSi	FeTi	FeAl	Na <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	Fe	Fe – лента
8,5	8	3,5	2,6	5,2	1,8	0,3	16,5	остальное

Для сравнения исследовали металл, полученный наплавкой хромовольфрамовой сталью 30Х2В8Ф, широко используемой для из-

готовления технологического инструмента горячего деформирования металла.

Испытания экспериментального состава

металла покрытия на окислительную стойкость (жаростойкость) проводили в условиях спокойной воздушной атмосферы по ГОСТ 6130-71. В качестве характеристики окислительной стойкости выбран прирост массы образцов при температуре 900 °С за время испытаний 25 ч.

Металлографические исследования окисленных образцов проводили на растровом электронном микроскопе JEOL JCM-5700 с энергодисперсионным спектрометром JED-2300.

Рентгенофазовый анализ продуктов окисления осуществляли на многофункциональ-

ном рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000. Для обработки и анализа дифракционных спектров применили пакет программ Match! версии 3.8.1.151.

### Результаты исследований и их обсуждение

Изменение прироста массы металла, наплавленного порошковой проволокой, состава 30Н8Х6МЗСТЮ и металла, наплавленного проволокой 30Х2В8Ф, в зависимости от времени выдержки в окислительной атмосфере представлены на рис. 1.

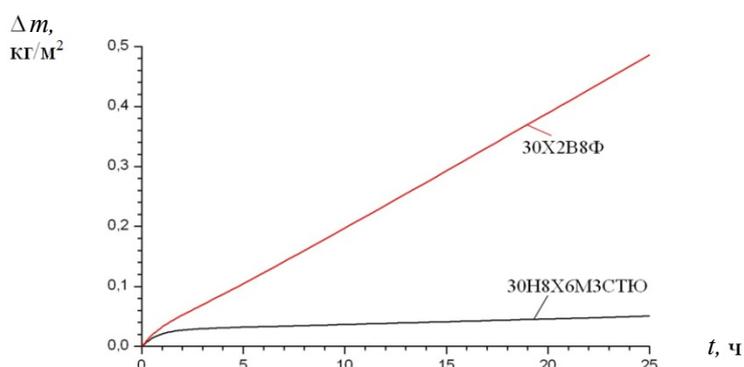


Рис. 1. Изменение прироста массы  $\Delta m$  металла 30Н8Х6МЗСТЮ и 30Х2В8Ф от времени выдержки при 900 °С

Как видно скачок прироста массы окислы на поверхности металла 30Н8Х6МЗСТЮ происходит в течение первого часа. В течение последующих четырех часов прироста массы окислы не наблюдается. После пяти часов испытаний скорость роста окислы возрастает, но в значительно меньшей степени, чем в первый час испытаний, и в дальнейшем эта зависимость практически прямолинейна. Так, если за 1 ч испытаний прирост массы окислы составил около 0,0295 кг/м<sup>2</sup>, то за 5 ч он составил всего 0,0216 кг/м<sup>2</sup>, а после 25 ч только 0,0506 кг/м<sup>2</sup>. При этом толщина окислы после 1 ч испытаний при 900 °С составляет всего 9,37...18,25 мкм, а после 5 ч – 27,45...40,07 мкм. На поверхности образца металла 30Н8Х6МЗСТЮ прошедшего 25 ч испытаний образовался однородный тонкий слой светлосерой плотной окислы, толщина которой практически не изменилась и составила 35,74...55,28 мкм.

Показатели окислыобразования стали

30Х2В8Ф значительно хуже металла 30Н8Х6МЗСТЮ. Так, за 1 ч испытаний прирост массы окислы составил около 0,0397 кг/м<sup>2</sup>, за 5 ч он уже составлял 0,0986 кг/м<sup>2</sup>, а после 25 ч – 0,4858 кг/м<sup>2</sup>. При этом толщина окислы после 1 ч испытаний при 900 °С составила 44,17...52,29 мкм, а после 5 ч – 70,07...81,17 мкм. На поверхности образца стали 30Х2В8Ф по истечении 25 часов толщина окисного слоя значительно возросла и составила 491,67...519,37 мкм.

Для выявления причины повышенной окислительной стойкости металла, наплавленного порошковой проволокой 30Н8Х6МЗСТЮ, проведены исследования структуры и фазового состава наплавленного металла и окислы.

Микроструктура шлифа боковой поверхности металла 30Н8Х6МЗСТЮ с окислой, полученной после выдержки 25 ч, с расположением точек сканирования приведена на рис. 2. Химический состав сканированных областей представлен в табл. 2.

2. Химический состав сканированных областей металла состава 30Н8Х6МЗСТЮ после испытания на окислительную стойкость при 900 °С – 25 ч

Точки №	N	O	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Mo
1	0	0	0,04	1,52	0,21	6,12	83,89	8,25	3,84
2	0	0	0,65	2,69	0,98	5,33	76,28	8,72	6,2
3	1,53	4,07	2,12	4,9	3,4	4,34	62,63	7,2	13,83
4	5,52	9,8	0,24	8,1	3,89	12,48	63,67	0,61	5,7
5	0,41	7,52	0,13	0,33	0,71	3,11	89,93	0,85	0
6	0,63	0,52	0	0,33	0	10,56	95,57	0,14	0,26
7	2,05	1,26	0,12	0,49	0,16	7,8	92,4	0,76	1,95

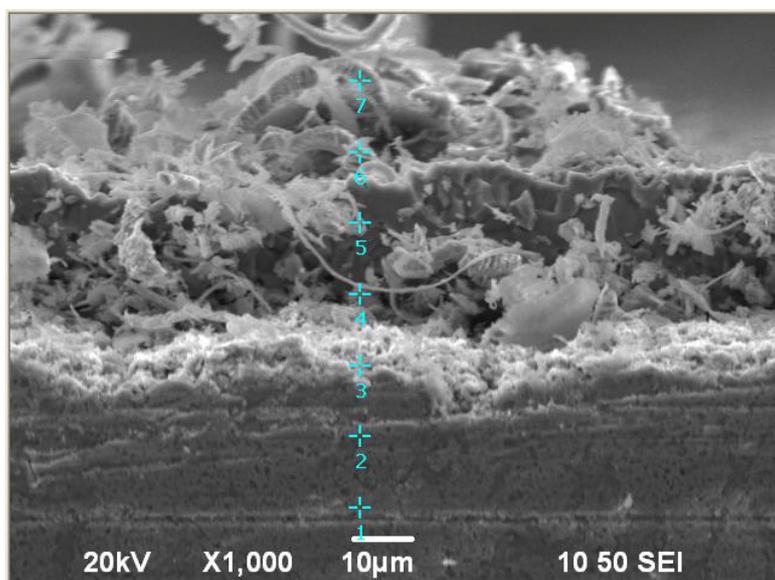


Рис. 2. Боковая поверхность шлифа металла состава 30Н8Х6МЗСТЮ с оксидным слоем после испытания на окислительную стойкость при 900 °С – 25 ч с расположением областей сканирования в точках

Из рис. 2 видно, что окалина слоистая, с множеством выходящих наружу полостей различной формы и размеров. В наружном слое окалины количество и дисперсность остатков не окисленного металла значительно меньше, чем в слое, прилегающем к металлу.

Результаты химического анализа показывают, что концентрации в металле основных легирующих элементов Ni, Mo, Cr, Si, Ti по мере приближения к переходному слою (рис. 2, точки 1, 2) остаются на высоком уровне. В переходном слое (точка 3) появляется кислород и азот, а концентрации всех легирующих элементов достигают очень высоких значений. По мере приближения к поверхности окалины (точки 4, 5, 6) концентрации Ti, Al, Si, Ni, Mo падают. Непосредственно у поверхности (точ-

ка 7) наблюдается высокая концентрация Cr и Mo.

Полученные результаты говорят о формировании в процессе окисления химической микронеоднородности в наплавленном покрытии. По мере приближения к окалине наблюдается обеднение металла основными легирующими элементами. Снижение концентрации основных легирующих элементов связано с их активным участием в диффузионных процессах вследствие воздействия высоких температур [6].

Характерная структура поверхностного участка окалины с расположением точек сканирования приведена на рис. 3. Химический состав сканированных объектов приведен в табл. 3.

3. Химический состав сканированных областей поверхности оксидного слоя металла состава 30Н8Х6МЗСТЮ после испытания на окислительную стойкость при 900 °С – 25 ч

Точка №	N	O	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Mo
1	5,34	19,13	0,51	0,1	0,39	12,21	48,45	12,92	0,95
2	0	19,79	1,76	1,11	1,16	8,78	55,77	11,63	0
3	4,4	15,04	1,45	0,58	1,37	14,55	50	11,99	0,62
4	5,16	14,93	0,75	0,37	0,57	12,78	54,13	11,11	0,2
5	5,14	13,14	1,11	1,75	0,11	11,14	55,92	9,74	1,95
6	5,24	21	1,67	0	0	8,77	51,67	10,42	1,23
7	9,72	14,83	0,61	0,09	0,16	6,78	63,87	2,98	0,96
8	13,04	17,21	1,27	0,04	0,29	10,13	49,02	9	0
9	0,84	10,1	0,44	0	0,95	8,93	62,47	14,55	1,72
10	9,3	19,14	1,37	0,23	0,53	12,21	46,05	11,17	0
11	6,86	12,04	0,66	0,23	1,54	10,72	59,08	7,98	0,89
12	7,2	18	0,63	0	0,38	8,41	63,01	1,22	1,15
13	10,26	21,92	1,3	0,83	0,45	11,62	43,86	9,49	0,27
14	0	21,79	1,29	0,51	0,15	9,75	55,25	10,19	1,07

Видно, что поверхностный слой окалины представляет собой хаотично переплетенную смесь конгломератов частиц неправильной формы с размерами до 5 мкм. Все частицы на основе Fe, Cr и Ni содержат кислород, а большинство из них ещё и азот. Ряд частиц содер-

жат все основные легирующие элементы (рис. 3, точки 1, 3, 4, 5, 7, 11, 13, 14). Другой ряд частиц содержит большей частью Fe, Cr, Ni, Ti, Al (точки 2, 3, 4, 8, 10, 11, 13). В некоторых объектах наблюдается высокая концентрация Mo (точки 1, 3, 5, 6, 7, 9, 11, 12, 14).

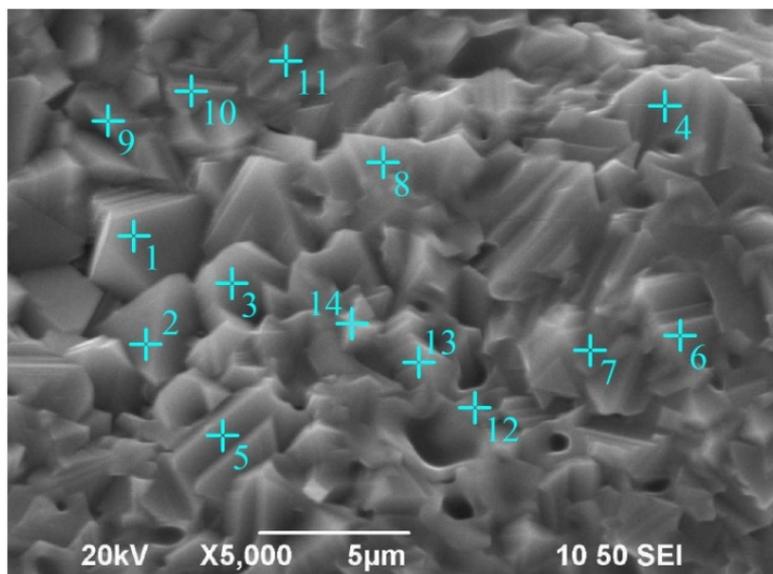


Рис. 3. Поверхность оксидного слоя металла состава 30Н8Х6МЗСТЮ после испытания на окислительную стойкость при 900 °С – 25 ч с расположением областей сканирования в точках

Результаты рентгеноструктурного анализа окалины металла состава 30Н8Х6МЗСТЮ после выдержки 25 ч при температуре 900 °С приведены на рис. 4.

Полученные результаты показывают, что

основой окалины металла состава 30Н8Х6МЗСТЮ наряду с Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и Cr<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub>, являются также Fe<sub>2</sub>NiO<sub>4</sub>, Fe<sub>3</sub>N, Ni<sub>1,875</sub>O<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Ni<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MoN<sub>0,506</sub>, FeCO<sub>3</sub>, Mo<sub>2</sub>C, Al<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>CO, TiN, Mo<sub>3</sub>O.

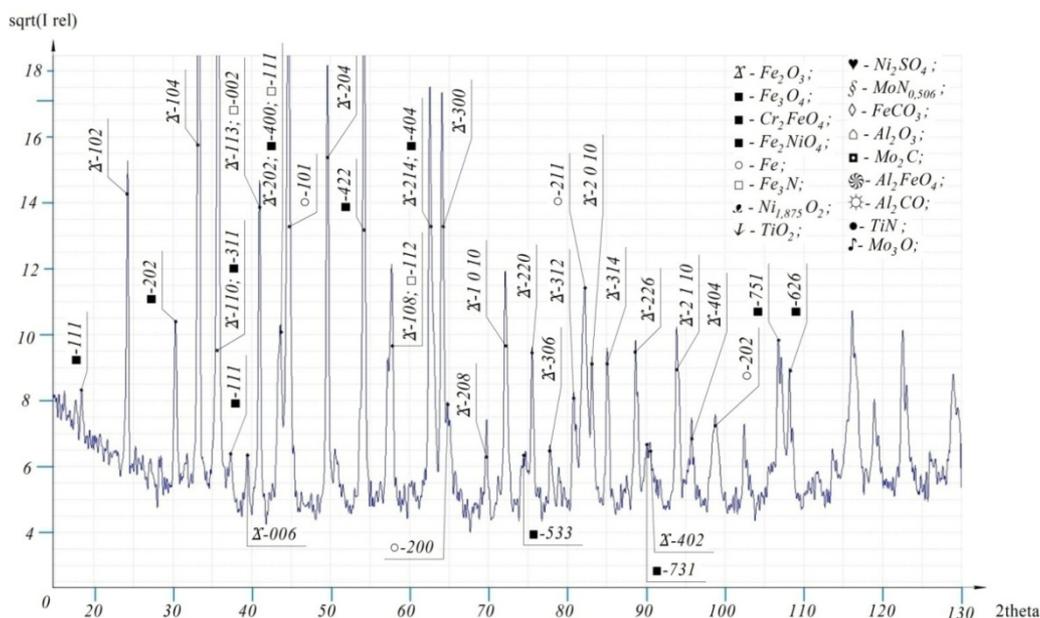


Рис. 4. Дифрактограмма окалины металла состава 30N8X6M3STYU после выдержки при температуре 900 °C – 25 ч

Таким образом, наличие в составе окалины соединений с высокими защитными свойствами обуславливает повышенную окалинстойкость наплавленного металла. Прирост массы окалины такого металла в 16,5 раз меньше, а ее толщина в 11 раз меньше, чем у металла, наплавленного проволокой 30X2B8Ф. Полученные результаты показывают, что металл, наплавленный порошковой проволокой ПП30N8X6M3STYU, может использоваться для нанесения покрытий на валки горячей прокатки.

### Заключение

Наплавленное покрытие из стали 30N8X6M3STYU подвержено незначительному поверхностному окислению. Средний прирост массы окалины металла такого покрытия при 900 °C составляет 0,002 кг/(м<sup>2</sup>·ч), что в 16,5 раза меньше чем у металла, наплавленного проволокой 30X2B8Ф. Поэтому такое покрытие может использоваться для нанесения на поверхности валков, работающих в условиях высоких температур, вплоть до 900 °C.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тепляков, Ю.Н. Высокотемпературное окисление металлов. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2017. – 215 с.
2. Шехтер, С.Я., Шварцер, А.Я. Наплавка деталей металлургического оборудования: Справочник. – М.: Металлургия, 1981. – 160 с.
3. Бирман, С.Р. Экономнолегированные мартенситно-стабилизирующие стали. – М.: Металлургия, 1974. – 208 с.
4. Еремин, Е.Н., Лосев, А.С., Пономарев, И.А., Бородихин, С.А. Влияние режимов термической обработки

на структуру, свойства и фазовый состав стали 10Г7М3С2АФТЮ, наплавленной порошковой проволокой // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2020. – № 5(171). – С. 3–8.

5. Eremin, E.N., Losev, A.S., Ponomarev, I.A., Borodikhin, S.A., Matalasova, A.E. The influence of aging on the structure and properties of metal 30N8Kh6M3STYU obtained by surfacing // Journal of Physics: Conf. Series: Mechanical Science and Technology Update. – 2019. – Vol. 1260. – P. 1–8.

6. Анастасиади, Г.П. Формирование химической микрогетерогенности в литейных сплавах. – СПб.: Политехника, 1991. – 148 с.

### REFERENCES

1. Teplyakov, Yu.N. *High-Temperature Metal Oxidation*. – Chelyabinsk: South-UralsSU Publishers, 2017. – pp. 215.
2. Schechter, S.Ya., Schwarzer, A.Ya. *Metallurgy Equipment Parts Weld Deposition: Reference Book*. – M.: Metallurgy, 1981. – pp. 160.
3. Birman, S.R. *Alloyed-Efficiently Maraging Steels*. – M.: Metallurgy, 1974. – pp. 208.
4. Yeryomin, E.N., Losev, A.S., Ponomaryov, I.A., Borodikhin, S.A. Impact of thermal treatment modes upon structure, properties and phase composition of 10G7M3S2AFTYU steel deposited with powder wire // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2020. – No.5(171). – pp. 3-8.
5. Eremin, E.N., Losev, A.S., Ponomarev, I.A., Borodikhin, S.A., Matalasova, A.E. The influence of aging on the structure and properties of metal 30N8Kh6M3STYU obtained by surfacing // Journal of Physics: Conf. Series: Mechanical Science and Technology Update. – 2019. – Vol. 1260. – P. 1–8.
6. Anastasiady, G.P. *Chemical Micro-heterogeneity Formation in Castable Alloys*. – S-Pb.: Polytechnica, 1991. – pp. 148.

Рецензент д.т.н. В.В. Акимов