

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771.237.016.2

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-67-77>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКИ ТРУБНОЙ СТАЛИ НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННОГО АУСТЕНИТА\*

Полецков П.П., Гущина М.С., Алексеев Д.Ю., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Никитенко О.А.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

### Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): в статье обоснована необходимость исследования влияния режимов контролируемой прокатки на формирование структуры и свойств трубной стали. Цель работы: исследование влияния режимов контролируемой прокатки низкоуглеродистой микролегированной трубной стали класса прочности К60 (Х70) на структурное состояние горячедеформированного аустенита. Используемые методы (эксперименты): в условиях научно-технического комплекса ООО «ИЦ Термодеформ-МГТУ» проведено физическое моделирование и исследование процесса контролируемой прокатки трубной стали класса прочности К60 (Х70) при различной степени деформации, температуре и продолжительности нагрева. Металлографический анализ образцов выполнен в ЦКП НИИ «Наносталей» при ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» методами световой микроскопии с использованием системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO. Результаты: получены следующие закономерности: при повышении температуры нагрева с 1100 до 1240°C и последующей прокатке с 5% обжатием среднее значение площади аустенитного зерна увеличивается более чем в 2 раза, при 50% обжатиях – в 1,3 раза. Фактор увеличения степени деформации не позволяет скомпенсировать рост зерна, вызванный повышением температуры нагрева под прокатку: для сляба, предварительно нагретого до 1150°C и прокатанного со степенью обжатия 5%, средняя и максимальная площадь зерна аустенита меньше, чем для сляба, нагретого до 1240°C и продеформированного на 50%. Критическая степень обжатия стали марки К60 находится в диапазоне 5–11%, причем с точки зрения получения мелкозернистой структуры даже единичные обжатия меньше критического приводят к увеличению размера зерна. Практическая значимость: полученные данные могут быть использованы при проектировании технологических режимов контролируемой прокатки трубной стали с повышенными эксплуатационными характеристиками.

**Ключевые слова:** трубная сталь, микроструктура, механические и эксплуатационные свойства, режимы контролируемой прокатки, горячедеформированный аустенит.

### Введение

В настоящее время на рынке металлопроката существует потребность в трубных сталях с повышенными механическими и эксплуатационными свойствами. Требования к таким сталям зависят от диаметра трубы, рабочего давления и условий эксплуатации. К примеру, трубная сталь категории прочности К60(Х70) для сложных условий эксплуатации должна иметь высокий уровень прочности, высокую ударную вязкость при низких температурах и хорошую свариваемость. При этом чем меньше размер зерна в микроструктуре стали, тем

выше прочность, пластичность и вязкость, ниже порог хладноломкости и меньше склонность металла к хрупкому разрушению (тест ИПГ) (**рис. 1**).

Вместе с тем в работах по исследованию влияния размера зерна феррита на переходную температуру хрупкого разрушения и ударную вязкость низкоуглеродистой стали было установлено следующее (**рис. 2**): переходная температура линейно снижается с измельчением зерна и становится ниже –196°C при величине зерна 1 мкм. Однако ударная вязкость  $KCV^{max}$  снижается при размере зерна менее 5 мкм вследствие низкой деформируемости. Следовательно, если требуется достаточная энергия удара, размер зерна должен быть не мельче 5 мкм, что дает переходную температуру около –50/–60°C. Значит, измельчение зерна неограниченно улучшает комплекс свойств стали. Предел текучести, действи-

\* Работа выполнена при участии аспирантов М.В. Мишукова, М.В. Малькова, А.Н. Шишлоновой, к.т.н. Ю.Ю. Ефимовой, к.т.н. Д.М. Чукина.

© Полецков П.П., Гущина М.С., Алексеев Д.Ю., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Никитенко О.А., 2018

тельно, повышается, и переходная температура хрупкого разрушения снижается, но при этом снижается вязкость и пластичность, критически повышается отношение предела текучести к временному сопротивлению разрыву  $\sigma_T/\sigma_B$ .

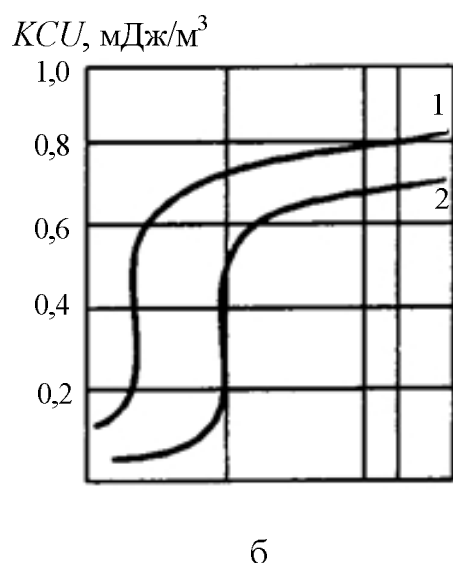
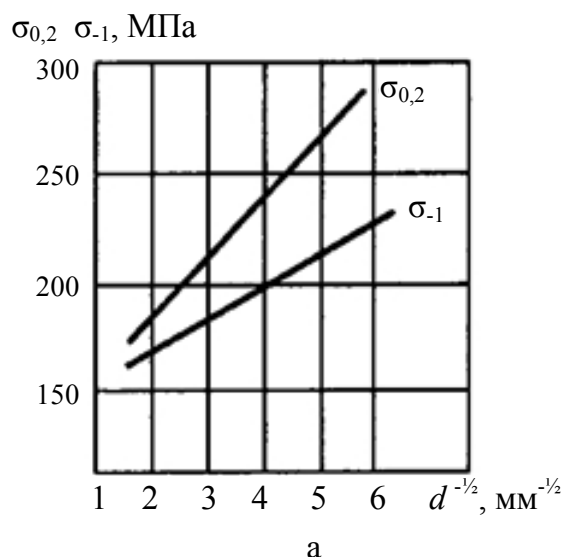


Рис. 1. Влияние величины зерна  $d$  на условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , предел выносливости  $\sigma_{-1}$  (а) и ударную вязкость  $KCU$  (б) низкоуглеродистой стали: 1 – мелкое зерно (0,04 мм); 2 – крупное зерно (0,09 мм) [1]

Одним из наиболее эффективных способов управления микроструктурой и свойствами готового проката является микролегирование и термомеханическая контролируемая прокатка (ТМКП). ТМКП – это многостадийный вид термомеханической обработки металла, предусматривающий последовательную деформацию металла при непрерывном снижении температуры в областях, созда-

ющих различное заданное структурное состояние, и затем регламентированное охлаждение, обеспечивающее сохранение искажений строения кристаллической решетки, внесенных пластической деформацией (рис. 3). Каждый этап процесса ТМКП выполняет свою роль в достижении необходимой структуры металла, влияя на протекание процессов роста зерна аустенита при нагреве слэба под прокатку, рекристаллизации аустенита,  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения, дисперсионного упрочнения [2].

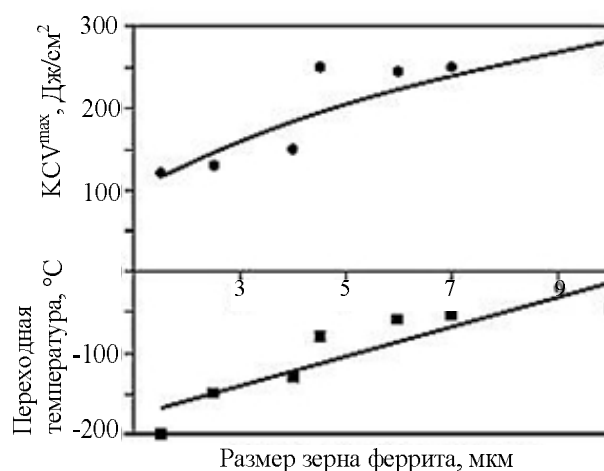


Рис. 2. Влияние размера зерна в стали на переходную температуру хрупкого разрушения и ударную вязкость

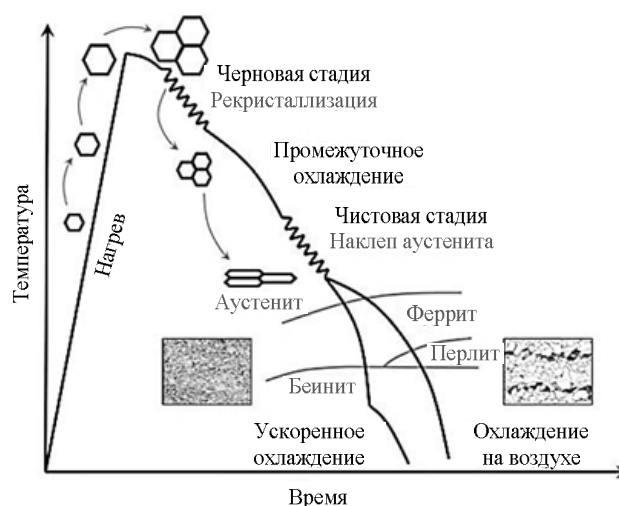


Рис. 3. Общая схема термомеханической прокатки [3]

На величину действительного зерна аустенита и продуктов его распада оказывает влияние химический состав металла, температура нагрева слэбов перед прокаткой и продолжительность выдержки при заданной температуре, а также температурно-деформационные режимы прокатки и скорость контролируемого охлаждения (рис. 4).

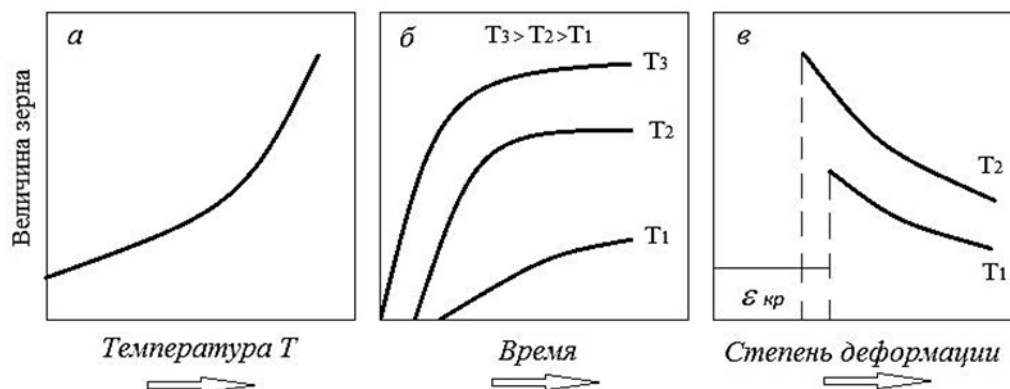


Рис. 4. Схема влияния температуры  $T$  (а), продолжительности нагрева (б) и степени предварительной деформации (в) на величину зерна [4]

В связи с вышеизложенным актуальным является исследование влияния режимов термомеханической обработки на размер зерна аустенита трубной стали класса прочности К60 (Х70).

#### Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Физическое моделирование и исследование процесса контролируемой прокатки трубной стали класса прочности К60 (Х70) при различной степени деформации, температуре и продолжительности нагрева проведено в работе с использованием оборудования лабораторного комплекса ООО «Инжиниринговый центр Термомехформ-МГТУ», а также ЦКП НИИ «Наносталей» при ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Коллектив ЦКП НИИ «Наносталей» имеет успешный опыт выполнения проектов в области разработки перспективных материалов и изделий из них [5–9].

Выплавку стали осуществляли в вакуумной индукционной печи ZG–0.06L (рис. 5). С целью формирования мелкозернистой ферритно-бейнитной микроструктуры низколегированная трубная сталь имеет низкое содержание углерода (0,05–0,08%), повышенное содержание марганца (1,4–1,7%), добавки элементов, повышающих устойчивость аустенита (Mo, Ni, Cu) и комплексное микролегирование карбонитридообразующими элементами ( $Nb+Ti+V \leq 0,15\%$ ). При

этом пониженное содержание углерода обеспечивает перевод ниобия в твердый раствор при нагреве слэбов под прокатку, что необходимо для расширения области отсутствия рекристаллизации аустенита и, соответственно, проработки структуры стали, а также способствует улучшению ударной вязкости и свариваемости стали [10–14]. Кроме того, пониженное содержание углерода и высокая чистота стали по вредным примесям ( $S \leq 0,003\%$ ,  $P \leq 0,012\%$ ) обеспечивают хорошую хладостойкость и свариваемость металла [15]. Химический состав исследуемой стали приведен в табл. 1.



Рис. 5. Выплавка стали в лабораторной вакуумной индукционной печи ZG–0.06L

Таблица 1

Химический состав трубной стали класса прочности К60 (Х70)

Массовая доля элементов, %						
C	Si	Mn	S	P	Микролегирующие	$C_{экв}$
0,05–0,08	0,20–0,30	1,4–1,7	$\leq 0,003$	$\leq 0,012$	$Nb+Ti+V \leq 0,15$	$\leq 0,43$
<b>Примечание:</b> величина углеродного эквивалента $C_{экв} = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$ .						

С целью определения величины критических обжатий при черновой стадии прокатки полученные заготовки нагревали в камерной печи до температуры  $1210 \pm 10$  °С. Дальнейшее обжатие осуществляли на гидравлическом прессе по шести различным вариантам: 3% относительное обжатие за одно осаживание, 5, 7, 9, 11, 13% (табл. 2). Температура начала деформации составляла  $1150 \pm 60$  °С, конца –  $1000 \pm 30$  °С. Слитки осаживались до 167 мм, дальнейшее охлаждение осуществлялось до температуры воды [16].

С целью исследования влияния продолжительности нагрева на процессы структурообразования горячедеформированного аустенита трубной стали заготовки нагревали в камерной печи до температур 1150, 1240 °С и выдерживали при соответствующей температуре в течение 40, 60, 120 мин. Часть образцов предварительно деформировали на 50% за одно осаживание на гидравлическом прессе (рис. 6, табл. 3).

С целью исследования влияния степени деформации и температуры нагрева на процессы

структурообразования горячедеформированного аустенита трубной стали заготовки нагревали в камерной печи до температур 1100, 1150, 1240 °С. Дальнейшее обжатие образцов осуществляли на гидравлическом прессе со степенью обжатия 5, 8, 11, 13, 50% за проход (см. табл. 4).



Рис. 6. Технологический процесс термомеханической обработки

Таблица 2

Режим обжатий

Номер образца	Степень обжатия, %	Высота слитка по «проходам», мм												
		300	291	282	273	265	257	249	242	234	227	220	213	206
1	3	199	193	187	181	175	169	–	–	–	–	–	–	–
2	5	300	285	271	257	244	232	221	210	199	189	180	171	162
3	7	300	279	259	241	224	209	194	181	168	–	–	–	–
4	9	300	273	248	226	206	187	170	–	–	–	–	–	–
5	11	300	267	238	211	188	168	–	–	–	–	–	–	–
6	13	300	261	227	198	172	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 3

Режимы исследования влияния температуры и продолжительности нагрева на структурное состояние горячедеформированного аустенита

Номер образца	Температура нагрева, °С	Время выдержки, мин	Степень деформации, %
7	1150	40	–
8		60	–
9		120	–
10		60	50
11		120	50
12	1240	40	–
13		60	–
14		120	–
15		60	50
16		120	50



Таблица 4

# Режимы исследования влияния степени деформации и температуры нагрева на структурное состояние горячедеформированного аустенита

Номер образца	Температура нагрева, °С	Температура начала черновой стадии, °С	Степень обжария, %	Σ деформация, %
17	1100	1000–1050	5	40
18			8	39
19			11	44
20			13	43
21			50	50
22	1150	1050–1100	5	40
23			8	39
24			11	44
25			13	43
26			50	50
27	1240	1150–1200	5	40
28			8	39
29			11	44
30			13	43
31			50	50

Для фиксации сформированного структурного состояния осуществляли «стоп-закалку» заготовок (охлаждение заготовки до температуры воды).

Раскрой промежуточных раскатов с вырезкой образцов осуществлялся в соответствии со схемой, представленной на **рис. 7**.

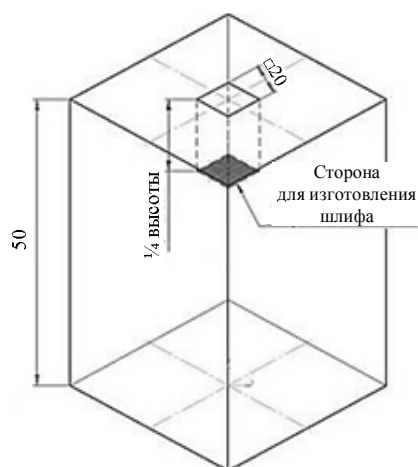


Рис. 7. Схема раскрытия промежуточного раската

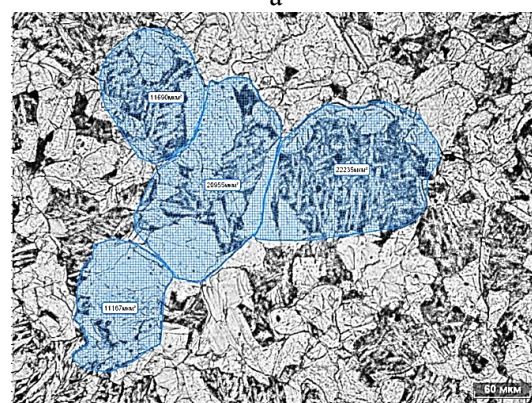
Металлографический анализ образцов выполнялся методами световой микроскопии с использованием системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO. Для выявления границ бывшего аустенитного зерна использовалось травление шлифов в свежеприготовленном насыщенном при комнатной температуре растворе пикриновой кислоты с добавлением (1–10)% поверхностно-активных веществ (ПАВ) и подогревом реактива до (50–70)°C.

Величину бывшего аустенитного зерна определяли в ручном режиме с помощью программ-

ного продукта Thixomet PRO путем измерения площади выделяемых зерен специализированным инструментом «Площадь» (рис. 8).



a



6

Рис. 8. Пример выделения и измерения площади бывших аустенитных зерен:

$a$  – исходная структура;  $b$  – структура при обработке инструментом «Площадь»

### Результаты исследования и их обсуждение

Микроструктура образцов, исследованная с помощью световой микроскопии, представляет собой ферритно-бейнитную смесь (рис. 9).

Результаты исследования по влиянию степени деформации на размер зерна аустенита представлены на рис. 10.

На основании данных металлографического исследования можно заключить, что критическая степень обжатия стали класса прочности К60 с

химическим составом в соответствии с табл. 1 находится в диапазоне 5–11% (рис.10). Причем с точки зрения получения мелкозернистой структуры даже единичные обжатия из критического диапазона приводят к увеличению размера зерна [17].

Результаты исследования влияния температуры и продолжительности нагрева на процессы структурообразования горячедеформированного аустенита трубной стали приведены на рис. 11, 12.

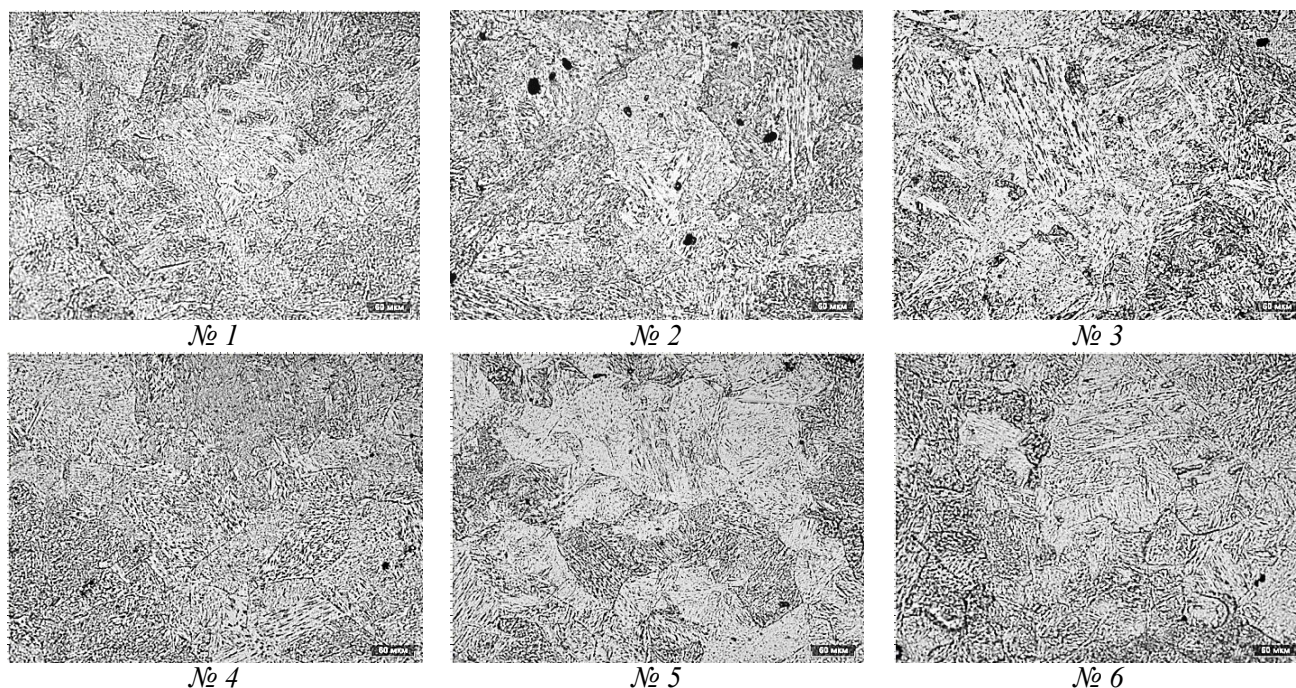


Рис. 9. Микроструктура образцов, исследуемых после травления в насыщенном растворе пикриновой кислоты с добавлением (1–10)% ПАВ, х 200 (номера образцов в соответствии с табл. 2)

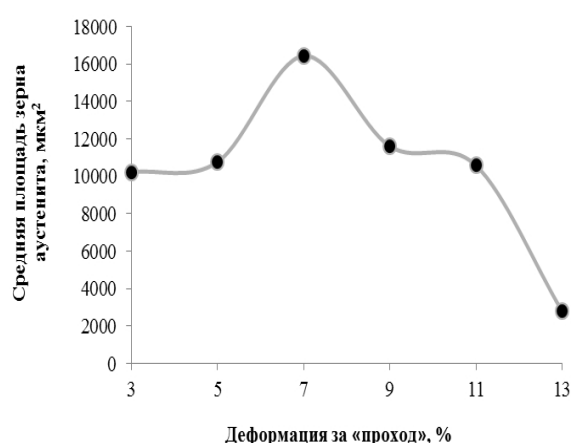


Рис. 10. Средняя площадь зерна аустенита образцов при черновой фазе прокатки

При увеличении времени выдержки при температуре аустенизации на 60 мин значение пло-

щади аустенитного зерна увеличивается в среднем в 1,5 раза (см. рис. 12).

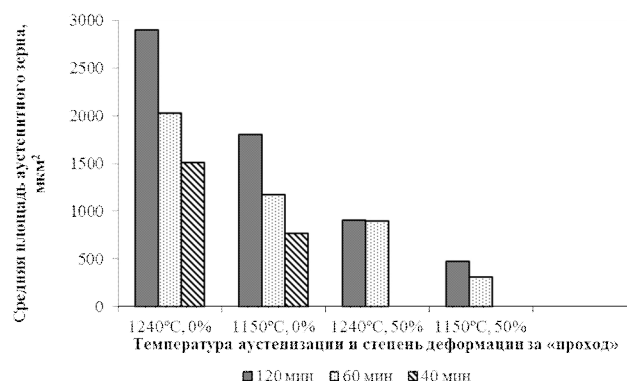


Рис. 12. Влияние продолжительности нагрева на среднее значение площади аустенитного зерна трубной стали



Результаты исследования влияния степени деформации и температуры нагрева на процессы структурообразования горячедеформированного аустенита трубной стали приведены на рис. 13–15. Установили, что при повышении температуры нагрева от 1100 до 1240°C и последующей прокатке с 5% обжатием среднее значение площади аустенитного зерна увеличивается  $\approx$  в 2 раза (с 960 до 2207 мкм<sup>2</sup>), при 50% обжати-

ях – в 1,3 раза (с 671 до 897 мкм<sup>2</sup>). При этом фактор увеличения степени деформации не позволил компенсировать рост зерна, вызванный повышением температуры нагрева под прокатку: для сляба, предварительно нагретого до 1150°C и прокатанного с критической степенью обжатий, равной 5%, средняя и максимальная площадь зерна аустенита меньше, чем для сляба, нагретого до 1240°C и деформированного на 50%.

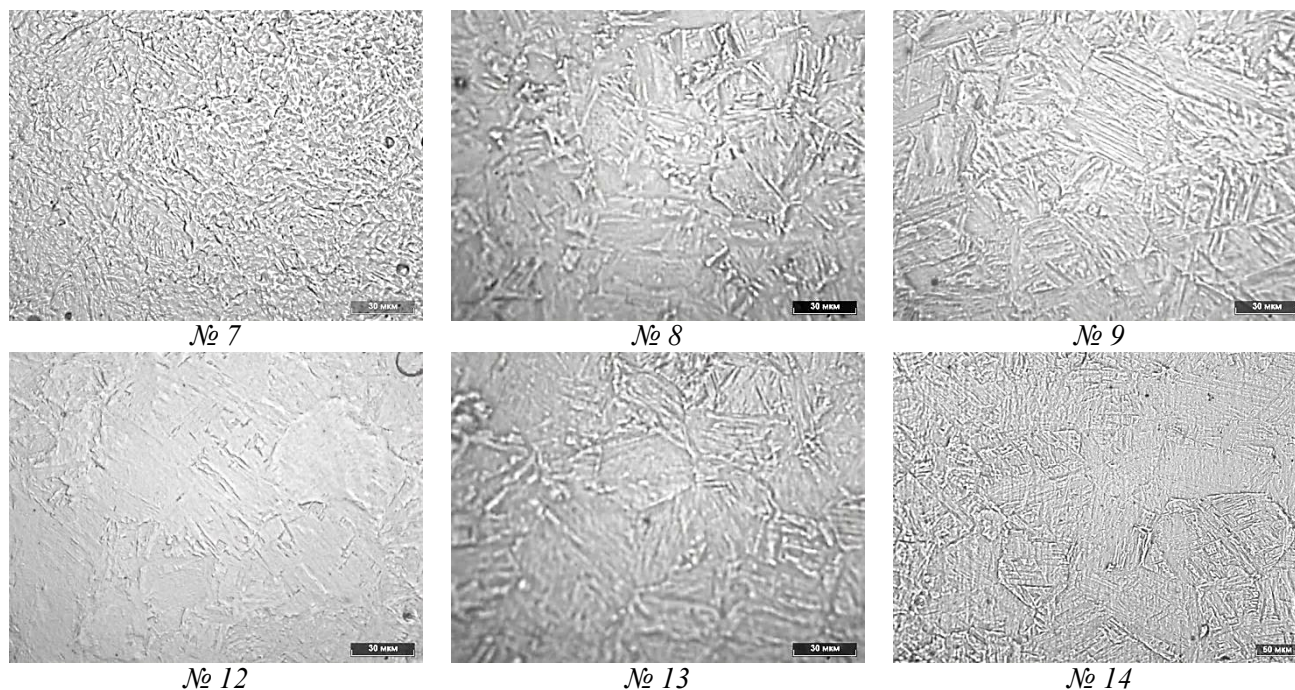


Рис. 11. Результаты металлографического анализа образцов, X500 (номера обозначены в соответствии с табл. 3): № 7 – 1150°C, 40 мин; № 8 – 1150°C, 60 мин; № 9 – 1150°C, 120 мин; № 12 – 1240°C, 40 мин; № 13 – 1240°C, 60 мин; № 14 – 1240°C, 120 мин

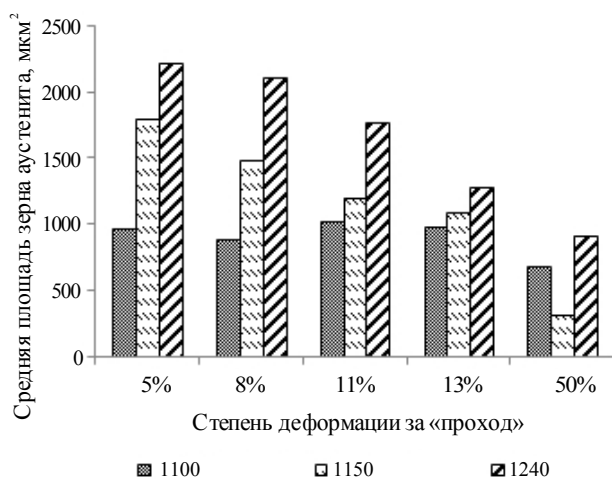


Рис. 14. Влияние температуры нагрева заготовок на среднее значение площади аустенитного зерна трубной стали

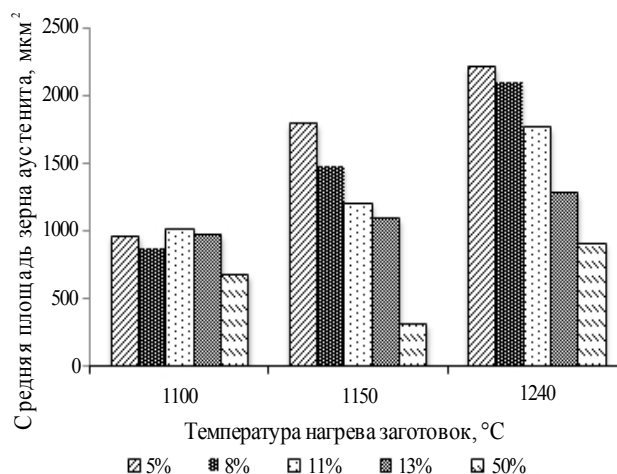


Рис. 15. Влияние степени деформации на среднее значение площади аустенитного зерна трубной стали



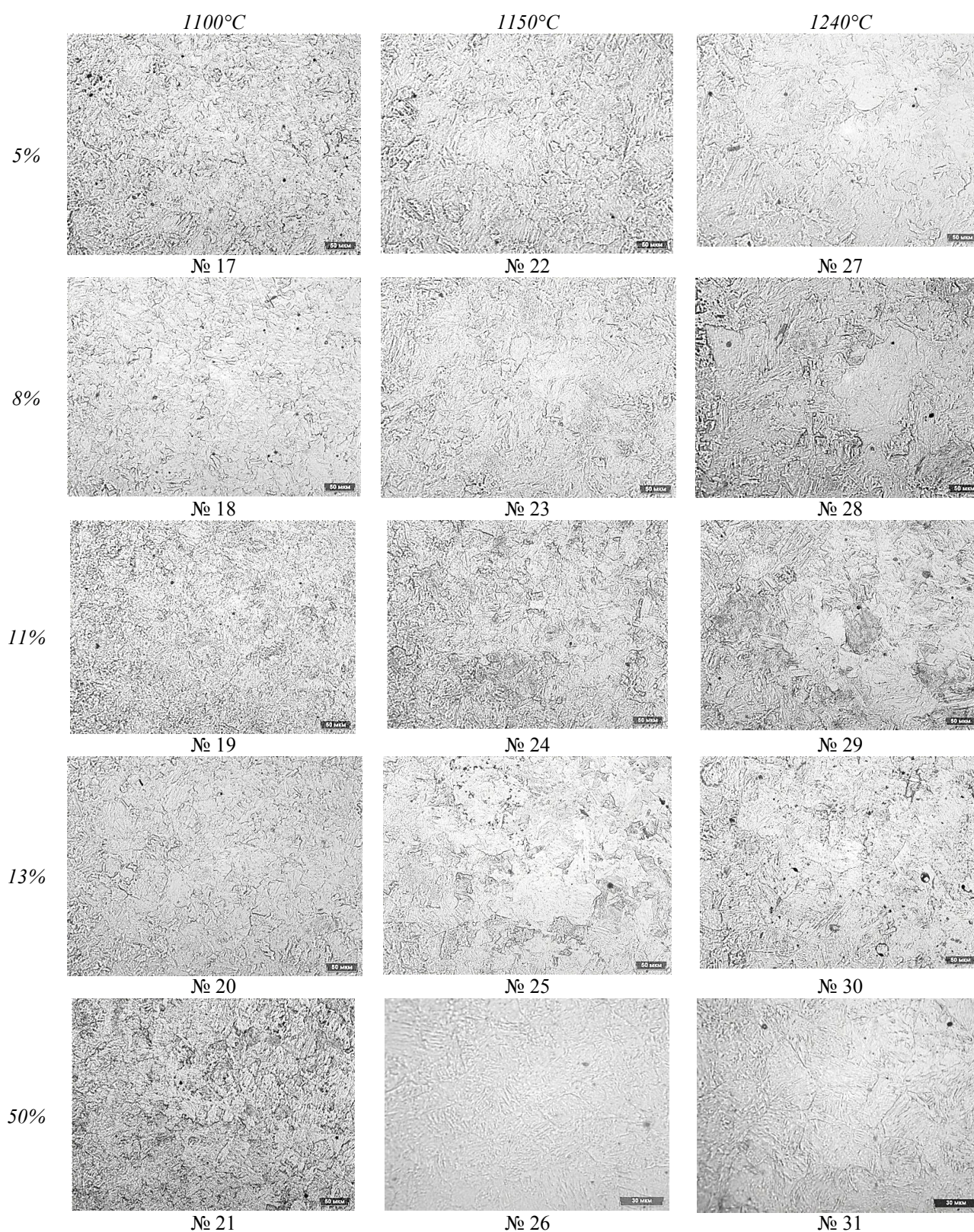


Рис. 13. Результаты металлографического анализа образцов, X500 (номера образцов обозначены в соответствии с табл. 4): № 17 – 1100°C, 5%; № 22 – 1150°C, 5%; № 27 – 1240°C, 5%; № 18 – 1100°C, 8%; № 23 – 1150°C, 8%; № 28 – 1240°C, 8%; № 19 – 1100°C, 11%; № 24 – 1150°C, 11%; № 29 – 1240°C, 11%; № 20 – 1100°C, 13%; № 25 – 1150°C, 13%; № 30 – 1240°C, 13%; № 21 – 1100°C, 50%; № 26 – 1150°C, 50%; № 31 – 1240°C, 50%



### Заключение

В результате исследования влияния режимов контролируемой прокатки низкоуглеродистой микролегированной трубной стали класса прочности К60 (Х70) на структурное состояние горячедеформированного аустенита получены следующие основные закономерности:

1. Критическая степень обжатия стали марки К60 находится в диапазоне 5–11%, причем с точки зрения получения мелкозернистой структуры даже единичные обжатия меньше критического приводят к увеличению размера зерна.

2. При увеличении времени выдержки при температуре аустенизации на 60 мин значение площади аустенитного зерна увеличивается в среднем в 1,5 раза.

3. При повышении температуры нагрева от 1100 до 1240°C и последующей прокатки с 5% обжатием среднее значение площади аустенитного зерна увеличивается более чем в 2 раза (с 960 до 2207 мкм<sup>2</sup>), при 50% обжатиях – в 1,3 раза (с 671 до 897 мкм<sup>2</sup>).

4. Фактор увеличения степени деформации не позволяет скомпенсировать рост зерна, вызванный повышением температуры нагрева под прокатку: для сляба, предварительно нагретого до 1150°C и прокатанного с критической степенью обжатия 5%, средняя и максимальная площадь зерна аустенита меньше, чем для сляба, нагретого до 1240°C и продеформированного на 50%.

Полученные данные могут быть использованы при проектировании технологических режимов изготовления трубной стали с повышенными эксплуатационными характеристиками.

*Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор 03.G25.31.0235).*

### Список литературы

1. Материаловедение: практикум / В.И. Городниченко, Б.Ю. Давиденко, В.А. Исаев и др. М.: Логос, 2004. 272 с.
2. Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали. М.: Металлургиздат, 2012. 696 с.
3. Мунтин А. В. Разработка технологии прокатки толстого листа с заданными свойствами из трубных марок стали на стане 5000: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2014. 141 с.
4. Зуев В. М. Термическая обработка металлов: учебник для техн. училищ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1981. 296 с.

5. Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения: монография / Чукин М.В., Корчунов А.Г., Бакшинов В.А. и др. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 276 с.
6. Перспективы производства высокопрочного крепежа из заготовок из углеродистых сталей с ультрамелкозернистой структурой / М.В. Чукин, М.А. Полякова, Г.Ш. Рубин и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. № 1. С. 39–44.
7. Гун Г.С., Чукин М.В. Оптимизация процессов технологического и эксплуатационного деформирования изделий с покрытиями: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2006. 323 с.
8. Создание и развитие теории квалиметрии металлургии / Гун Г.С., Рубин Г.Ш., Чукин М.В. и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2003. № 3. С. 67.
9. Гун Г.С., Пудов Е.А., Иванова Л.Б. Оптимизация процессов обработки металлов давлением по комплексному критерию качества // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1986. № 12. С. 47.
10. Daniel H. Herring. Grain Size and Its Influence on Materials Properties. August 2005 – IndustrialHeating.com.
11. Fernandez A.I., Ablad R., Lopez B., Rodrigues-Ibabe J.M. Effect of course  $\gamma$  grain size on the dynamic and static recrystallization during hot working in microalloyed Nb and Nb-Ti steels. Microalloying in Steels. Proceedings of the International conference on «Microalloying in Steels» (Donostia-San Sebastian, Basque Country, Spain, 7–9 September, 1998), pp. 135–142.
12. Muhammad Aatif Irshad. The effect of prior austenite grain size on the machinability of a pre-hardened mold steel. Master of Science in Engineering, Mechanical Engineering, 2011.
13. Pereda B., Fernandez A. Effect of Mo on Dynamic Recrystallization Behavior of Nb-Mo Microalloyed Steels. ISIJ International, vol. 47 (2007), no. 6, pp. 860–868.
14. Влияние легирующих элементов на свойства сталей при различных скоростях охлаждения / М.В. Чукин, П.П. Полецков, Д.Г. Набатчиков и др. // Естественные и технические науки. 2016. №8. С. 62–65.
15. Chukin M.V., Poletskov P.P., Nikitenko O.A., Nabatchikov D.G. Study of microstructure of rolled heavy plates made of low-alloyed pipe steel with increased strength and cold resistance. CIS Iron and Steel Review, vol. 13 (2017), pp. 28–32.
16. Совершенствование технологии контролируемой прокатки низколегированных сталей / В.М. Салганик, П.П. Полецков, Г.А. Бережная и др. // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2015. № 2. С. 9–13.
17. Исследование влияния степени деформации на размер зерна аустенита низколегированной стали / В.М. Салганик, П.П. Полецков, Г.А. Бережная и др. // Производство проката. 2016. №3. С. 3–8.

Поступила 21.03.18

Принята в печать 14.05.18

## UNDERSTANDING THE EFFECT OF CONTROLLED ROLLING REGIMES FOR PIPE STEEL ON THE STRUCTURAL CONDITION OF HOT-DEFORMED AUSTENITE

**Pavel P. Poletskov** – DSc (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

E-mail: pavel\_poletskov@mail.ru.

**Marina S. Gushchina** – Postgraduate Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

E-mail: gushchina.ms@mail.ru.

**Daniil Yu. Alekseev** – Postgraduate Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

E-mail: d.u.alekseev@mail.ru.

**Dinara G. Emaleeva** – PhD (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

E-mail: emaleevadg@mail.ru.

**Alla S. Kuznetsova** – Research Fellow

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: allakuznetsova.mgtu@mail.ru.

**Olga A. Nikitenko** – PhD (Eng.), Research Fellow

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: olganikitenko@list.ru.

### Abstract

**Problem Statement (Relevance):** This paper gives reasoning to why it is necessary to understand the effect of controlled rolling regimes on the structure and properties of pipe steel. **Objectives:** The objective is to understand the effect of controlled rolling of low-carbon microalloyed K60 (X70) pipe steel on the structural condition of hot-deformed austenite. **Methods (Experiments) Applied:** Using the facilities of the Thermodeform-NMSTU Research Centre, the physical process of controlled rolling of K60 (X70) pipe steel was simulated and analysed at various strains, temperatures and heating times. The metallographic analysis of the specimens was carried out by NMSTU's Institute for Nanosteels through optical microscopy and using the Thixomet PRO image analyzer. **Findings:** The following regularities were established: An increase in the heating temperature from 1,100 to 1,240 °C and subsequent rolling with a 5 % reduction lead to a more than double growth in the average area of the austenitic grain (a 50 % reduction results in a 1.3-times growth). An increased degree of reduction won't make up for the grain growth caused by a higher pre-rolling heating temperature. Thus, in the case of a slab preheated to 1,150 °C and rolled at a 5 % reduction, the average and maximum sizes of the austenitic grains would be less than in the case of a slab heated to 1,240 °C and deformed at a 50 % reduction. The critical reduction rate for the K60 steel grade is within 5 to 11 %, and from the perspective of obtaining a fine-grained structure, even single reductions below the critical reduction rate lead to bigger grain sizes. **Practical Relevance:** The data obtained can be used for designing controlled rolling regimes for pipe steel grades with enhanced performance.

**Keywords:** Pipe steel, microstructure, mechanical properties and performance, controlled rolling regimes, hot-deformed austenite.

*This research was funded by the Ministry of Education and Science of Russia as part of a comprehensive project aimed at designing a high-tech production line and realized together with a Russian higher education institution (Contract 03.G25.31.0235).*

### References

1. Gorodnichenko V.I., Davidenko B.Yu., Isaev V.A. et al. *Materialovedenie: Praktikum* [Materials Science: Practicum]. Moscow: Logos, 2004, 272 p. (In Russ.)
2. Efron L.I. *Metallovedenie v «bol'shoj» metallurgii. Trubnye stali* [Physical metallurgy in the context of 'big' metallurgy. Pipe steel grades]. Moscow: Metallurgizdat, 2012, 696 p. (In Russ.)
3. Muntin A.V. *Razrabotka tekhnologii prokatki tolstogo lista s zadannymi svojstvami iz trubnyh marok stali na stane 5000. Diss. ... kand. tekhn. nauk* [Developing a rolling technology for the production of plates with specified properties from pipe steel grades in Plate Mill 5000. PhD dissertation]. Moscow, 2014, 141 p. (In Russ.)
4. Zuev V.M. *Termicheskaja obrabotka metallov: uchebnik dlja tehniceskix uchilishch. 2-e izdanie, pererab. i dop.* [Heat treatment of metals: Textbook for technical schools. Issue 2 (rev.)]. Moscow: Vysshaya Shkola, 1981, 296 p. (In Russ.)
5. Chukin M.V., Korchunov A.G., Bakshinov V.A. et al. *Proizvodstvo vysokoprochnoj stal'noj armatury dlja zhelezobetonnyh shpal novogo pokolenija: monografija* [Manufacture of high-strength steel reinforcing bars for new generation reinforced concrete sleepers: Monograph]. Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University, 2018, 120 p. (In Russ.)



- gorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, 276 p. (In Russ.)
6. Chukin M.V., Polyakova M.A., Rubin G.Sh. et al. Prospective production of high-strength fasteners from ultrafine-grained carbon steel blanks. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and stamping operations. Metal forming], 2014, no. 1. pp. 39-44. (In Russ.)
  7. Gun G.S., Chukin M.V. *Optimizatsiya protsessov tekhnologicheskogo i ekspluatatsionnogo deformirovaniya izdeliy s pokryiyami: monografiya* [Optimized deformation of products with coatings in production line and in operation: Monograph]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2006, 323 p. (In Russ.)
  8. Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V. et al. Formulation and development of metallurgical qualimetry theory. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2003, no. 3, p. 67. (In Russ.)
  9. Gun G.S., Pudov E.A., Ivanova L.B. Optimization of metal forming processes based on a complex criterion of quality. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of higher education institutions. Ferrous metallurgy], 1986, no. 12, p. 47. (In Russ.)
  10. Daniel H. Herring. Grain Size and Its Influence on Materials Properties. August 2005 – IndustrialHeating.com.
  11. Fernandez A.I., Ablad R., Lopez B., Rodrigues-Ibabe J.M. Effect of coarse  $\gamma$  grain size on the dynamic and static recrystallization during hot working in microalloyed Nb and Nb–Ti steels. Microalloying in Steels. Proceedings of the International conference on «Microalloying in Steels». Donostia–San Sebastian, Basque Country, Spain, 7–9 September, 1998, pp. 135-142.
  12. Muhammad Aatif Irshad. The effect of prior austenite grain size on the machinability of a pre-hardened mold steel. Master of Science in Engineering, Mechanical Engineering, 2011.
  13. B. Pereda, A. Fernandez. Effect of Mo on Dynamic Recrystallization Behavior of Nb–Mo Microalloyed Steels. *ISIJ International*, Vol. 47 (2007), no. 6, pp. 860-868.
  14. Chukin M.V., Poletskov P.P., Nabatchikov D.G., Gushchina M.S., Berezhnaya G.A. Effect of alloying elements on the properties of steels at different cooling rates. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and engineering sciences], 2016, no. 8. pp. 62-65. (In Russ.)
  15. Chukin M.V., Poletskov P.P., Nikitenko O.A., Nabatchikov D.G. Study of microstructure of rolled heavy plates made of low-alloyed pipe steel with increased strength and cold resistance. *CIS Iron and Steel Review*. Vol. 13 (2017), pp. 28-32.
  16. Salganik V.M., Poletskov P.P., Berezhnaya G.A., Gushchina M.S., Alekseev D.Yu. Improved process of controlled rolling of low-alloyed steels. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov* [Processing of solid and laminated materials], 2015, no. 2, pp. 9-13. (In Russ.)
  17. Salganik V.M., Poletskov P.P., Berezhnaya G.A., Gushchina M.S., Alekseev D.Yu. Understanding the influence of the deformation rate on the austenitic grain size in low-alloyed steel. *Proizvodstvo prokata* [Rolling], 2016, no. 3, pp. 3-8. (In Russ.)

Received 21/03/18

Accepted 14/05/18

---

**Образец для цитирования**

Исследование влияния режимов контролируемой прокатки трубной стали на структурное состояние горячедеформированного аустенита / Полецков П.П., Гушина М.С., Алексеев Д.Ю., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Никитенко О.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 67–77. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-67-77>

**For citation**

Poletskov P.P., Gushchina M.S., Alekseev D.Yu., Emaleeva D.G., Kuznetsova A.S., Nikitenko O.A. Understanding the effect of controlled rolling regimes for pipe steel on the structural condition of hot-deformed austenite. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 67–77. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-67-77>

---