

УДК 621.77

Н.Г. Колбасников, Ю.А. Безобразов, А.А. Огольцов

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ ТОЛСТОГО ЛИСТА ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ НА СТАНЕ 2000

Kolbasnikov N.G., Yu.A. Bezobrazov, A.A.Ogoltsov

HOT ROLLING SCHEDULES ANALYSIS OF HIGH STRENGTH PIPE-LINE STEEL THICK SHEET ON MILL 2000

Исследовано влияние параметров горячей прокатки на стане 2000 на эволюцию структуры высокопрочной трубной стали. Проведено компьютерное моделирование формирования структуры и механических свойств стали в программе HSMM, AusEvol+, AusTran. Физическое моделирование термомеханической обработки стали выполнено на симуляторе Gleeble-3800. Найденные режимы обеспечивают получение механических свойств, удовлетворяющих требованиям ISO к трубным сталям категории прочности X80.

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА. МИКРОЛЕГИРОВАННЫЕ ТРУБНЫЕ СТАЛИ. КОМПЬЮТЕРНОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

The influence of continuous mill 2000 hot rolling parameters on the high strength pipeline steel structure evolution was investigated. Computer simulation of structure and mechanical properties formation was realized with the help of Hot Strip Mill Model (HSMM), AusEvol + and AusTran programs. Physical simulation of metal thermomechanical treatment was made by Gleeble-3800. Found modes are provided to receipt mechanical properties that meet ISO requirements for the X80 strength class pipeline steels.

THERMOMECHANICAL PROCESSING. MICROALLOYED PIPELINE STEELS. COMPUTER AND PHYSICAL SIMULATION.

В последние годы российские компании ведут активное освоение новых месторождений нефти и газа, что поддерживает высокий спрос на трубы большого диаметра (ТБД). Одним из основных производителей широкого листа для ТБД в России является ОАО «Северсталь», где такой лист в основном прокатывается на стане 5000. В настоящее время рассматривается возможность производства листа трубных сталей категорий прочности X80 на стане 2000. В связи с этим разработка режимов прокатки таких сталей на этом стане представляет практический интерес.

На первом этапе разработки промышленных режимов прокатки новых сталей обычно выполняется серия экспериментов по их физическому моделированию с использованием современных термомеханических симуляторов, таких, как комплексы Gleeble [1–4]. При этом значительная экономия времени и средств может быть достигнута, если предварительно перспективные

режимы выбираются с привлечением соответствующих математических моделей. Известным примером модели, которая может быть использована для этих целей, — HSMM (Hot Strip Mill Model) [5]. Однако применимость данной модели для современных микролегированных трубных сталей не вполне обоснована в связи с их преимущественно бейнитной микроструктурой. Отмеченный недостаток HSMM может быть компенсирован использованием дополнительных математических моделей, позволяющих рассчитывать эволюцию микроструктуры рассматриваемых сталей как на стадии их горячей прокатки, так и при последующем ускоренном охлаждении, в процессе которого аустенит распадается с образованием практически важных составляющих, включая бейнит. Кроме того, необходимо использовать математические модели для предсказания конечных механических свойств формирующихся структур. Такие моде-

ли были разработаны авторами ранее и реализованы в компьютерных программах AusEvol+ и AusTran [6, 7], которые позволяют проводить все необходимые расчеты за исключением температурно-деформационного режима процесса. В то же время программа HSMM, адаптированная к условиям стана 2000 [8], позволяет проводить отмеченные расчеты. Таким образом, объединив возможности перечисленных программ, можно моделировать конечную микроструктуру горячекатаной стали и оценивать ее механические свойства.

Цель настоящей работы — демонстрация того, как можно разрабатывать перспективные режимы прокатки трубной стали на стане 2000 ОАО «Северсталь», используя возможности современного математического и физического моделирования [9]. В результате проведенных исследований предложен режим прокатки трубной стали категории прочности X80, удовлетворяющей требованиям ISO [10] по механическим свойствам.

Компьютерное моделирование горячей прокатки

Моделирование температурно-деформационного и скоростного режима прокатки проведено с использованием лицензионной программы HSMM, которая была ранее адаптирована для выполнения соответствующих расчетов применительно к стану 2000 [8]. Структурная схема агрегатов данного стана представлена на рис. 1. Химический состав исследуемой стали следующий:

Химический элемент	Содержание (масс.), %
C	0,06
Si	0,2
Mn	1,7
P	<0,001
S	<0,001
Mo	0,2

Al	0,03
Nb	0,045
Ti	0,02
V	0,04
N	0,005

Основной целью проведения совокупности моделирующих расчетов был выбор режимов прокатки, обеспечивающих получение минимального размера зерна аустенита после горячей прокатки, и скорости последующего охлаждения проката, которая позволяет формировать бейнитную структуру, обладающую требуемым уровнем свойств.

Для достижения этих целевых показателей варьировали скорость прокатки и распределение обжатий в клетях стана с учетом ограничений по энергосиловым параметрам оборудования и принятой конечной толщине полосы (16 мм). Кроме того, добивались приемлемого выравнивания по температуре полосы на промежуточном рольганге ($\Delta T < 30$ °C), а также необходимой температуры начала чистовой прокатки.

При моделировании режимов прокатки с использованием программы HSMM в качестве базовой марки выбрана сталь HSLA Nb-V-Ti, химический состав которой близок к составу исследуемой стали.

Размеры сляба приняты равными 250×800×10300 мм. Его начальная температура (температура выдержки в печи) полагалась равной 1200 °C. Начальный размер зерна аустенита принимали равным 80 мкм, что соответствует выдержке данной стали в течение 60 секунд при температуре 1200 °C.

Результаты расчета параметров прокатки в черновой группе клетей представлены в табл. 1. Рассчитанные значения параметров деформации и изменения температуры металла были использованы в качестве входных данных в программе AusEvol+, с помощью которой выполнены расчеты изменения размера зерна аустенита,



Рис. 1. Структурная схема стана 2000 ОАО «Северсталь»

Таблица 1

Результаты моделирования черновой прокатки на стане 2000

Номер режима	Печь	Скорость прокатки, м/с	Истинная деформация в клетях					Толщина после клетки №5, мм	$T_{НП}, ^\circ\text{C}$	$T_{КП}, ^\circ\text{C}$	d_γ , мкм
			CR1	CR2	CR3	CR4	CR5				
1	№1	2	0,25	0,53	0,55	0,53	0,47	26	1182	1109	54
2		4,5	0,25	0,55	0,49	0,51	0,46	28			
3	№4	2	0,20	0,43	0,46	0,44	0,41	38	1156	1093	52
4		4,5	0,20	0,43	0,40	0,42	0,40	42			

$T_{НП}$ — температура начала прокатки; $T_{КП}$ — температура конца прокатки; d_γ — размер зерна аустенита после выдержки на промежуточном рольганге в течение 60 сек

а также выделения частиц Nb(CN). Их результаты приведены в табл. 1 и на рис. 2. Из табл. 1 видно, что в соответствии с полученными данными минимальный размер зерна аустенита после черновой прокатки и использованной выдержки на промежуточном рольганге достигается в случае прокатки по режиму 4. Этот режим был выбран в качестве оптимального и использовался в моделировании дальнейшей эволюции микроструктуры аустенита при чистой прокатке.

На следующем этапе моделирования были проведены расчеты, в которых при фиксированном режиме горячей прокатки варьировали длительность выдержки на промежуточном

рольганге, скорость прокатки и режимы обжатий в чистой группе клетей. Параметры режимов чистой прокатки, моделируемой с помощью программы HSMM, а также результаты расчета размера зерна аустенита и содержания Nb в твердом растворе, полученные с помощью программы AusEvol+, приведены в табл. 2 и на рис. 3.

Из данных, приведенных в табл. 4 и на рис. 3, видно, что прокатка по режимам 4 и 5 обеспечивает получение наименьших размеров зерна аустенита при значительной разнице содержания Nb в твердом растворе. В связи с этим данные режимы были выбраны как наиболее перспективные для дальнейшего исследования.

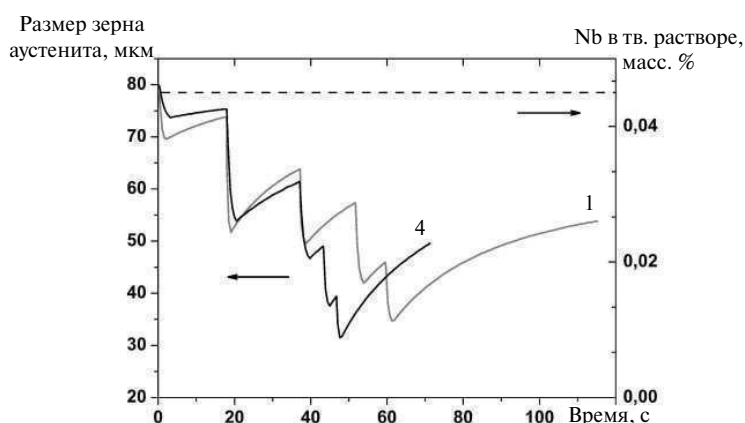


Рис. 2. Изменение размера зерна аустенита (сплошные линии) и концентрации Nb в твердом растворе (пунктирная линия) в процессе черновой прокатки по режимам 1 и 4, рассчитанные с помощью программы AusEvol+

Таблица 2

Результаты моделирования чистой прокатки на стане 2000 с помощью программ HSMM и AusEvol+

Номер режима	Скорость прокатки, м/с	Выдержка на пром. рольганге, с	$T_{\text{HM}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{КП}}, ^\circ\text{C}$	$d_{\gamma}, \text{мкм}$	$C_{\text{Nb}}^{\text{SS}}, \text{масс. \%}$
1		0	1049	997	28	0,028
2	4	60	1019	976	37	0,017
3		300	856	847	69	0,008
4		0	1086	1083	20	0,045
5	21	60	1033	1037	23	0,022
6		300	878	906	70	0,014

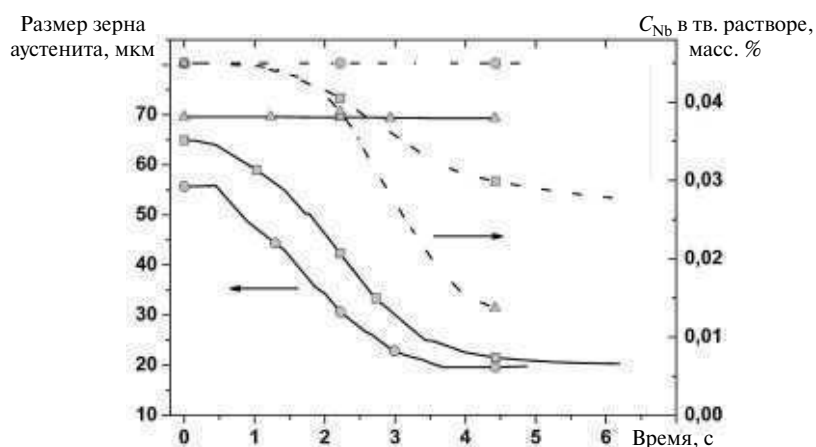
 $C_{\text{Nb}}^{\text{SS}}$ — концентрация Nb в твердом растворе

Рис. 3. Изменение размера зерна аустенита (сплошные линии) и концентрации Nb в твердом растворе (пунктирная линия) в процессе чистой прокатки по режимам 4, 5 и 6, рассчитанные с помощью программы AusEvol+ (—○— — 4; —□— — 5; —△— — 6)

На заключительном этапе поиска режимов прокатки и последующего ускоренного охлаждения, обеспечивающих получение высокого уровня конечных механических свойств стали, было проведено моделирование распада аустенита после прокатки по режимам 4 и 5. Соответствующие расчеты с помощью программы AusTraп выполнены для скоростей охлаждения 5 и 10 °C/с. Полученные результаты по предсказанию значений определяющих параметров конечных микроструктур и рассчитанных на их основе механических свойств приведены

в табл. 3. Морфология и размер бейнитных пакетов главным образом определяют механические свойства полученного материала. Для оценки механических свойств использованы эмпирические формулы, полученные для исследуемой стали [3]:

$$\sigma_{\text{B}} = 420 + (9,7V_{\text{ГБ}} + 14,3V_{\text{РБ}} + 9V_{\text{АФ}}) d_{\text{Б}}^{-0,5};$$

$$\sigma_{\text{T}} = 302,7 + (7,3V_{\text{ГБ}} + 13,7V_{\text{РБ}} + 8,1V_{\text{АФ}}) d_{\text{Б}}^{-0,5},$$

где σ_{T} — предел текучести, МПа; σ_{B} — предел прочности, МПа; $V_{\text{ГБ}}$, $V_{\text{РБ}}$, $V_{\text{АФ}}$ — объемные доли соответственно гранулярного, реечного бейни-

та и ацикулярного феррита, %; d_B — размер бейнитного пакета, мкм. Из табл. 4 видно, что для обоих режимов прокатки, как и следовало ожидать, максимально высокий уровень свойств получен при наибольшей скорости охлаждения.

Согласно полученным результатам оба режима прокатки в сочетании со скоростью охлаждения $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ обеспечивают формирование полностью бейнитных структур с близкими значениями микроструктурных параметров. Согласно данным выполненных расчетов механических свойств предсказываемые значения предела текучести составляют 644 и 637 МПа, а предела прочности — 797 и 794 МПа соответственно для режимов 4 и 5. Результаты предсказания механических свойств стали после обработки по режимам, найденным в результате проведенной серии моделирующих расчетов, были проверены путем ее физического моделирования.

Физическое моделирование горячей прокатки

Схемы режимов термомеханической обработки исследуемой стали, проведенной на комплексе Gleeble 3800, представлены на рис. 4, а. Эксперименты по режимам 1–4 были выполнены для получения бейнитных микроструктур, химическое травление которых позволило определить размеры бывших аустенитных зерен после черновой (режимы 1, 2) и чистовой (режимы 3, 4) стадий прокатки. Эксперименты, проведенные по режимам 5 и 6, реализуют физическое

моделирование всей прокатки и последующего ускоренного охлаждения стали по режимам, найденным в результате математического моделирования технологического процесса. Кроме того, дополнительно режимы 5 и 6 были реализованы на специально разработанных образцах, которые после обработки на Gleeble можно испытывать на маятниковом копре для определения ударной вязкости образца. Чертеж разработанного образца представлен на рис. 4, б. После обработки на комплексе Gleeble образец фрезеруется до размеров, удовлетворяющих ГОСТ 9454–78, и испытывается на ударный изгиб при пониженной, комнатной или повышенной температуре. Количественный анализ полученных микроструктур выполнен с использованием анализатора изображений ThixometPro. Результаты экспериментального определения среднего размера зерна аустенита и его расчетов, выполненных с использованием программы AusEvol+, представлены в табл. 4. Сравнение представленных данных показывает их хорошее количественное согласие.

Микроструктура стали, обработанной по режимам 5, 6 (см. рис. 3), представляет собой смесь реечного и гранулярного бейнита (рис. 5).

На последнем этапе экспериментальной работы были проведены механические испытания образцов исследуемой стали, обработанных на комплексе Gleeble-3800 при физическом моделировании технологической цепочки производства полосы по режимам 5 и 6.

Таблица 3

Результаты расчета с помощью программы AusTran параметров микроструктур стали, формирующихся в результате охлаждения аустенита с разными скоростями после горячей прокатки по режимам 4 и 5 с

$V_{\text{охл}}$, $^\circ\text{C}/\text{с}$	$C_{\text{Nb}}^{\text{SS}}$, масс. %	d_γ , мкм	Бейнит разной морфологии, %			d_B , мкм	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа
			ГБ	РБ	АФ			
<i>Режим прокатки 4</i>								
5	0,044	36,5	72	28	0	14,5	709	541
10	0,045	33,5	34	66	0	11,4	797	644
<i>Режим прокатки 5</i>								
5	0,017	27,4	80	20	0	14,3	701	530
10	0,021	25,9	41	59	0	11	794	637

$V_{\text{охл}}$ — скорость охлаждения; d_B — размер бейнитного пакета

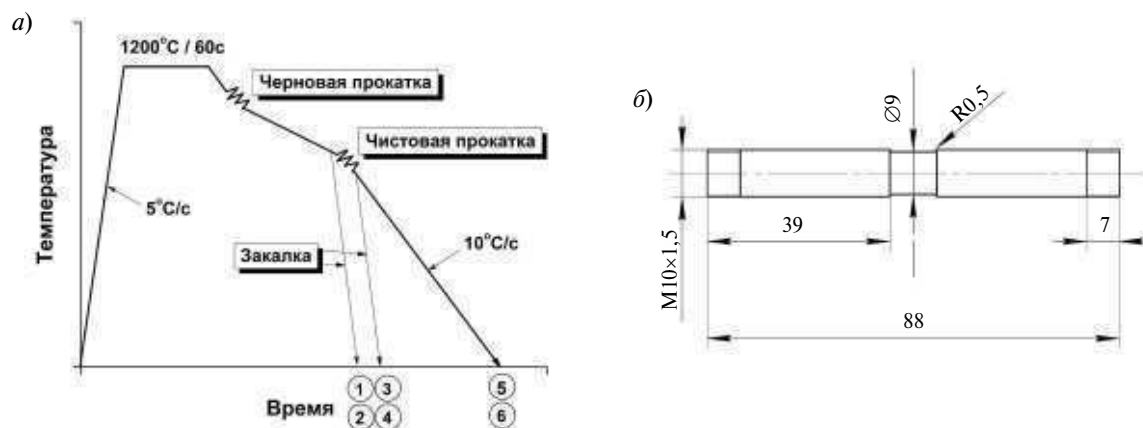


Рис. 4. Режимы термомеханической обработки стали на комплексе Gleeble-3800 (а) и схема образца для моделирования многостадийной пластической деформации на модуле Pocket Jaw симулятора Gleeble-3800 и для дальнейшего определения ударной вязкости (б)

Таблица 4

Результаты расчета и измерения размеров зерна аустенита после различных режимов обработки образцов на комплексе Gleeble-3800

Номер режима	d_{γ} , мкм		Относительная ошибка δ , %
	Расчет	Эксперимент	
1	53	43	23,8
2	63	60	5,5
3	31	32	3,1
4	37	32	15,6

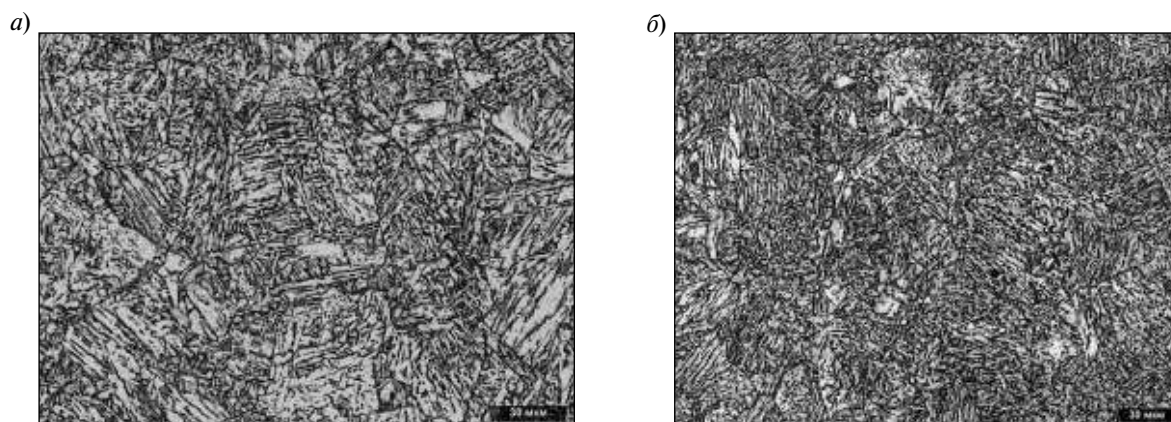


Рис. 5. Микроструктуры ($\times 1000$) исследуемой стали, полученные в результате физического моделирования горячей прокатки по режимам 5 (а) и 6 (б)

Таблица 5

Механические свойства исследуемой стали после обработки по режимам 5 и 6

Номер режима	Расчетные значения		Измеренные значения				Относительная ошибка расчета	
	σ_T , МПа	σ_B , МПа	σ_T , МПа	σ_B , МПа	$\delta_{корр.}$, %	KCV ₋₂₀ , Дж/см ²	σ_T , %	σ_B , %
5	644	797	594	809	33	121	8,4	1,5
6	637	794	608	770	38	122	4,8	3,1
Среднее:							6,6	2,3

Образцы испытывали на разрывной машине Zwick//Roell Z100 со скоростью растяжения 2 мм/мин. Кроме того, были проведены испытания по определению ударной вязкости полученных микроструктур.

Сравнение результатов экспериментального исследования механических свойств с данными расчетов, выполненных с использованием разработанных моделей, показывает хорошее согласие по всем свойствам (табл. 5).

Найденные режимы прокатки позволяют удовлетворить требованиям к пределу прочности, пределу текучести, относительному удлинению и ударной вязкости, что подтверждается сравнением полученных механических свойств исследуемой стали со следующими требованиями ISO к свойствам трубной стали категории прочности X80:

- σ_T , МПа 555–705
- σ_B , МПа 625–825
- σ_T/σ_B 0,93

- δ , % > 25
- KCV₋₂₀, Дж/см² 40–80

Основные результаты представленной работы сводятся к следующему:

С использованием компьютерных программ AusEvol+, AusTran и программы HSMM проведен поиск оптимальных режимов прокатки трубной стали на стане 2000 ОАО «Северсталь». Найденные режимы обеспечивают получение механических свойств, удовлетворяющих требованиям ISO к трубным сталям категории прочности X80.

Одновременное использование программ AusEvol+ и AusTran позволяет количественно моделировать эволюцию микроструктуры аустенита на стадии горячей прокатки сталей и его распада при ускоренном охлаждении, а также оценивать конечные механические свойства. Отмеченные возможности программ создают основу для компьютерного поиска оптимальных режимов промышленного производства горячекатаных сталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bezobrazov, Yu.A.** High Strength Dual-Phase Steel Structure Evolution During Hot Rolling [Text] / Yu.A. Bezobrazov, N.G. Kolbasnikov, A.A. Naumov // Materials Science & Technology 2012 Conference & Exhibition (MS&T'12), Thermal and Thermomechanical Processing Session.— Pittsburgh, PA, USA.— P. 1054–1061.
2. **Naumov, A.A.** Novel Physical Simulation Technique Development for Multistage Metal Plastic Deformation Processing [Text] / A.A. Naumov, Yu.A. Bezobrazov, N.G. Kolbasnikov, E.V. Chernikov // Materials Science Forum.— 2013. Vol. 762.— P. 62–69.
3. **Колбасников, Н.Г.** Эволюция структуры высокопрочной двухфазной стали при горячей прокатке [Текст] / Н.Г. Колбасников, Ю.А. Безобразов, А.А. Наумов // Сталь.— 2013. №7.— С. 73–79.
4. **Колбасников, Н.Г.** Исследование эффекта Баушингера, физическое моделирование формирования свойств микролегированной стали в процессе изготовления труб [Текст] / Н.Г. Колбасников, О.Г. Зотов, И.С. Мартяшов, Р.В. Сулягин // Сталь.— 2012. №8.— С. 56.
5. <http://www.integpg.com/>
6. **Соколов, С.Ф.** Исследование и моделирование эволюции микроструктуры и сопротивления деформации сталей при горячей обработке давлением [Текст]: Автореф. дис. .. канд. тех. наук / С.Ф. Соколов.— СПб., 2013.

7. **Соколов, Д.Ф.** Разработка моделей распада аустенита и прогнозирования механических свойств при контролируемой прокатке сталей [Текст]: Автореф. дис. ... канд. тех. наук / Д.Ф. Соколов.— СПб., 2013.— 23 с.

8. **Колбасников, Н.Г.** Внедрение компьютерной программы HOT STRIP MILL MODEL (HSMM) в прокатное производство для управления структурой и свойствами сталей [Текст] / Н.Г. Колбасников // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2007.

№3.— С. 38–47.

9. **Безобразов, Ю.А.** Подтверждение методики растяжение-сжатие для физического моделирования процессов многостадийной пластической деформации металлов [Текст] / Ю.А. Безобразов, Н.Г. Колбасников, А.А. Наумов // Сб. трудов: СММТ. 2013.— Санкт-Петербург, 2013.— С. 305–307.

10. Трубы для трубопроводов. Технические условия API Spec 5L [Текст] / ISO 3183.— 2008.— 154 с.

REFERENCEС

1. **Bezobrazov Yu.A., Kolbasnikov N.G., Naumov A.A.** Improvement of Tension-Compression Technique Developed for Physical Simulation of Multistage Metal Plastic Deformation Processing // АММТ 2013, Spb, 2013, #3.— p.305–307.

2. **Naumov A.A., Bezobrazov Yu.A., Kolbasnikov N.G., Chernikov E.V.** Novel Physical Simulation Technique Development for Multistage Metal Plastic Deformation Processing [Text] // Materials Science Forum.— 2013. Vol. 762.— P. 62–69.

3. **Kolbasnikov N.G., Bezobrazov Y.A., Naumov A.A.** High Strength Dual-Phase Steel Structure Evolution During Hot Rolling [Text] // Steel/— 2013. №7.— P. 73–79.

4. **Kolbasnikov N.G., Zotov O.G., Martyashov I.S., Sulyagin R.V.** Bauschinger effect investigation, physical simulation of the formation properties of microalloyed steel

during pipe production [Text] // Steel.— 2012. №8.— P. 56. 5. <http://www.integpg.com/>

6. **Sokolov S.F.** Research and Simulation of Microstructure Evolution and Deformation Resistance of Steels During Hot Working [Text]: Ph.D. Thesis.— St. Petersburg State Polytechnical University.— St. Petersburg, 2013.

7. **Sokolov D.F.** Development of austenite decomposition and mechanical properties prediction models during controlled rolling steel [Text]: Ph. D. Thesis.— St. Petersburg State Polytechnical University, St. Petersburg, 2013.

8. **Kolbasnikov N.G.** The introduction of HSMM computer program in rolling production to control the structure and properties of steels [Text] // Scientific and technical sheets SPSPU.— 2007. №3.— P. 38–47.

9. Pipes for pipelines. Technical Specifications API Spec 5L [Text] / ISO 3183.— 2008.— P. 154.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЗОБРАЗОВ Юрий Алексеевич — аспирант кафедры пластической обработки металлов Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: nw86master@mail.ru

КОЛБАСНИКОВ Николай Георгиевич — доктор технических наук профессор кафедры пластической обработки металлов Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; ; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: nikolay.kolbasnikov@gmail.com

ОГОЛЬЦОВ Алексей Андреевич — менеджер Центра технического развития и контроля (ЦТРК); ОАО «СеверСталь»; 162608, ул. Мира 30, Череповец, Россия; e-mail: Alexey.Ogoltsov@severstal.com

AUTHORS

BEZOBRAZOV Yuriy A. — postgraduate, Metal Processing Department, IMM&T, Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: nw86master@mail.ru

KOLBASNIKOV Nikolay G. — Doctor of Technical Sciences, Metal Processing Department, IMM&T, Professor; Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: nikolay.kolbasnikov@gmail.com

OGOLTSOV Alexey A. — manager Centre of Technical Development and Control CTDC; JSC «SeverStal»; 162608, Mira Str. 30, Cherepovets, Russia; e-mail: Alexey.Ogoltsov@severstal.com