



УДК 621.77

*Н.Г. Колбасников, Ю.А. Безобразов***ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРАВКИ ГОТОВОГО ПРОКАТА
НА КОНЕЧНЫЕ СВОЙСТВА ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА***N.G. Kolbasnikov, Yu.A. Bezobrazov***FINISHED ROLLED STRETCHING TEMPERATURE EFFECT
ON MECHANICAL PROPERTIES FORMATION
OF LARGE DIAMETER PIPES**

Представлены результаты физического моделирования с применением комплекса Gleeble-3800 отдельных стадий изготовления труб большого диаметра и исследовано их влияние на конечные свойства материала трубы. Методом «растяжение—сжатие» исследовано влияние правки листа, формовки трубы, экспандирования и термического цикла нанесения полимерного покрытия на прочностные и пластические свойства.

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА; МИКРОЛЕГИРОВАННЫЕ ТРУБНЫЕ СТАЛИ; КОМПЬЮТЕРНОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ГОРЯЧАЯ ПРОКАТКА.

The physical simulation results on Gleeble-3800 of the individual stages production of large diameter pipes are presented and the effect of these stages on the final properties of the pipe material was investigated. Using «tension-compression» method for the physical simulation on Gleeble-3800 the stretching temperature effect on mechanical properties formation of large diameter pipes was investigated at each stage pipes redivision: molding, expansion and polymer coating thermal cycle.

THERMOMECHANICAL PROCESSING; MICROALLOYED PIPELINE STEELS; COMPUTER AND PHYSICAL SIMULATION; HOT ROLLING.

Производство сталей с заданными уровнем механических свойств и параметрами структуры — одна из основных задач металлургического производства. Эта задача стоит и при производстве труб большого диаметра из современных марок микролегированных сталей. Известно, что на свойства горячекатаного металла влияют практически все технологические факторы, начиная от исходной структуры литой заготовки и заканчивая условиями охлаждения готового проката, причем наиболее заметное влияние оказывают термомеханические параметры чистовой прокатки и ускоренного контролируемого охлаждения. Между тем принято считать, что режимы правки листа в силу небольших величин пластической деформации не оказывают заметного влияния на свойства штрипса. Очевидно, именно этот факт послужил причиной того, что режимы правки не учитываются при регламентировании технологических параметров, отвечающих за формиро-

вание свойств горячекатаной стали. Трубный передел оказывает заметное влияние на механические свойства основного металла труб, особенно на предел текучести. Это связано с тем, что при холодной формовке, экспандировании, нанесении полимерного покрытия и испытаниях механических свойств на разогнутой пробе в металле происходит знакопеременная пластическая деформация, приводящая к изменению предела текучести вследствие проявления эффекта Баушингера [1–4]. Для целенаправленной корректировки технологии изготовления трубных сталей и труб необходимо получить представления о вкладе каждой из технологических операций в формирование конечных свойств трубы. Для достижения этой цели было поставлено исследование, которое состояло в воспроизведении процессов контролируемой прокатки толстого листа, правки (прокатный передел), формовки, экспандирования и нанесения полимерного по-

крытия (трубный передел) на одном образце. При реализации подобного эксперимента обработку образца можно в любой момент остановить, исследовать структуру и свойства металла и определить тем самым вклад каждой из операций в конечные свойства готовой трубы. Для имитации технологии изготовления толстого листа из трубной стали, формовки и экспандирования труб использовали разработанную ранее методику «растяжение — сжатие» [5–10] на модуле Pocket Jaw термомеханического комплекса Gleeble-3800.

Методика проведения эксперимента. Для исследований были разработаны специальные захваты для комплекса Gleeble и образцы, представленные на рис. 1. Рабочая часть этих образцов не теряет устойчивости пластической деформации при многократных циклах «растяжение — сжатие», что позволяет выполнить физическое моделирование всего цикла изготовления трубы.

К середине рабочей части образцов приваривали термопару и в этом же сечении закрепляли высокоточный измеритель поперечной деформации. Эти же образцы использовали после дополнительной обработки для тестирования механических свойств и исследования структуры. Испытания по определению механических свойств выполняли также на комплексе Gleeble. Исследования были проведены на микролегированной трубной стали категории прочности X80.

Физическое моделирование контролируемой прокатки на стане 5000, правки, формовки, экспандирования и термического цикла нанесения полимерного покрытия. Технологический цикл горячей прокатки толстого листа для труб большого диаметра состоит из нескольких стадий.

Металл нагревают до температуры 1150–1220 °С, выдерживают при этой температуре для достижения структурного состояния гомогенного твердого раствора. После выдачи из печи струей водовоздушной смеси сбивают печную окалину и подают металл к прокатному стану. Прокатку начинают при температуре поверхностного слоя исходной непрерывно-литой заготовки 1000–1050 °С, в то время как среднемассовая температура металла по расчетным данным составляет приблизительно 1100–1150 °С. Черновая прокатка включает 7–12 проходов, после чего толщина раската составляет 90–120 мм. После черновой прокатки металл охлаждается на рольганге до температуры начала чистовой прокатки, которая составляет 780–850 °С. Чистовую прокатку проводят за 10–15 проходов до заданных размеров готового листа, после чего от температур 690–710 °С металл охлаждают со скоростью 15–20 °С/с до температуры 550–600 °С. После прокатки лист правят на правильной машине и охлаждают до комнатной температуры. В ряде случаев правку выполняют повторно при комнатной температуре.

Трубный передел состоит в формовке листа в трубу на прессе пошаговой формовки, экспандировании трубы для придания требуемого размера и формы. Окончательной операцией является нанесение наружного и внутреннего «гладкостных» полимерных покрытий. Для нанесения покрытий после ряда подготовительных операций трубу нагревают до температуры приблизительно 200 °С и выдерживают около 20 минут.

Схема физического эксперимента по моделированию контролируемой прокатки представлена на рис. 2. Образцы нагревали до температуры

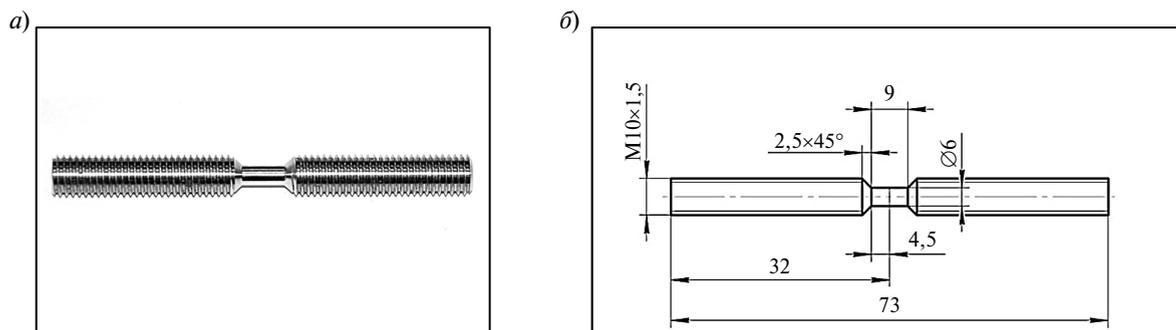


Рис. 1. Вид (а) и размеры образца для испытаний (б) с использованием методики «растяжение — сжатие»

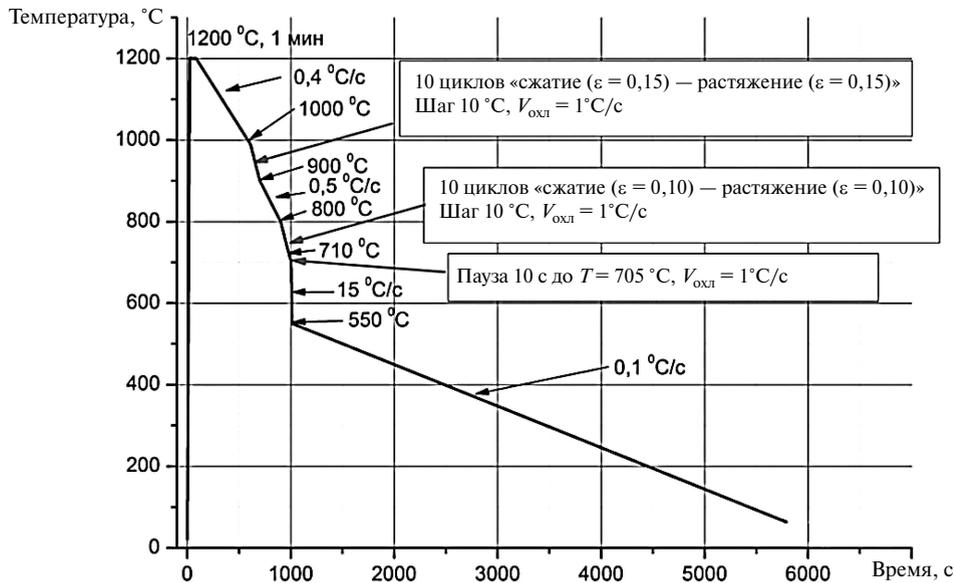


Рис. 2. Схема физического моделирования контролируемой прокатки

1200 °С со скоростью 5 °С/с, выдерживали 1 мин для аустенизации, затем охлаждали со скоростью 0,4 °С/с до температуры 1000 °С.

При моделировании черновой прокатки металл деформировали 10 раз растяжением — сжатием с истинной степенью деформации $\epsilon = \epsilon_{\text{раст}} + \epsilon_{\text{сж}} = 0,15 + 0,15 = 0,3$ со скоростью 1 с⁻¹ через каждые 10 °С. Таким образом, стадия черновой прокатки была завершена при 900 °С, после чего металл охлаждали со скоростью 0,5 °С/с до температуры начала чистой прокатки, равной 800 °С. Пауза при подстуживании металла составила 200 секунд.

При моделировании чистой прокатки и ускоренного контролируемого охлаждения (УКО) выполняли десять деформаций растяжением — сжатием со степенью деформации 10 % на каждом этапе. Температура окончания чистой прокатки составила 710 °С, по достижении которой металл охлаждали до температуры 705 °С со скоростью 0,5 °С/с, а затем охлаждали со скоростью 15 °С/с до температуры 550 °С. До температуры правки металл охлаждали со скоростью 0,1 °С/с. Образцы, обработанные по режиму, представленному на рис. 3, имели следующие свойства: $\sigma_T = 640$ МПа; $\sigma_B = 890$ МПа; $\sigma_T/\sigma_B = 0,72$; $\psi = 80$ %. Относительное удлинение не измеряли, поскольку геометрические размеры образца позволяли использовать только датчик

поперечной деформации. После физического моделирования контролируемой прокатки на Gleeble на полученных образцах было исследовано:

влияние температуры правки на изменение свойств штрипса;

влияние деформаций при формовке и экспандировании на свойства трубного полуфабриката;

влияние термического цикла при нанесении полимерных покрытий на конечные свойства материала трубы.

Моделирование правки. Правка готового проката на роликовой правильной машине показана на рис. 3. Она представляет собой изгибные деформации полосы между роликами по затухающей синусоиде, в результате чего прокат приобретает плоскую форму, а возможные искривления устраняются. После остывания до комнатной

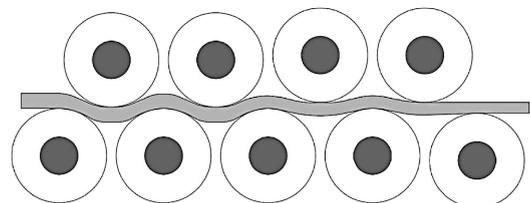


Рис. 3. Схема правки в роликовой правильной машине

температуры прокатанный лист может вновь приобрести искривленную форму из-за неравномерности температур листа при правке. В этом случае металл подвергают повторной правке.

Таким образом, температура правки может составлять от 550 до 20 °С. Физическое моделирование правки полосы выполнено при помощи последовательных деформаций растяжением и сжатием по режиму, близкому к реальным технологическим параметрам правки толстого листа на 9-тироликовой машине, который представлен в таблице. Температуру знакопеременной деформации (имитация правки) изменяли от 20 до 500 °С.

Режим правки полосы, моделируемый на Gleeble-3800

Номер цикла	Истинная деформация, %	
	Растяжение	Сжатие
1	1,2	1,2
2	0,5	0,5
3	0,2	0,2

Изменение предела текучести стального листа после правки по указанному режиму в зависимости от температуры правки представлено на рис. 4. Видно, что температура правки металла после контролируемой прокатки существенно влияет на предел текучести металла.

Понижение предела текучести после правки (см. рис. 4) при температурах 20–300 °С по сравнению с горячекатаным состоянием обусловлено, как принято считать, проявлением эффекта Ба-

ушингера, так как последней деформацией при правке была деформация сжатия. Подобный эффект может быть объяснен генерацией свободных дислокаций при малых деформациях во время правки, которые при смене знака нагружения движутся в обратную сторону при меньшем напряжении; повышение σ_1 после правки при 400 °С вызвано, очевидно, фиксацией генерированных при правке дислокаций внедренными атомами углерода — эффект, аналогичный печному упрочнению (*bake hardening*), используемому для упрочнения автомобильных сталей при сушке лакокрасочного покрытия. При этом закрепленные атомами углерода дислокации при смене знака нагружения являются барьерами для вновь образующихся и движущихся дислокаций, создавая тем самым дополнительное упрочнение.

Моделирование формовки, экспандирования и термического цикла нанесения полимерного покрытия. При пошаговой *формовке* труб большого диаметра происходит изгиб по всей длине листа. Изгибные деформации неоднородны по сечению, их максимум сосредоточен в приповерхностных слоях металла. Для прямошовных труб степень деформации внешних слоев может быть грубо оценена как отношение толщины стенки к диаметру — t/D . Для труб размером 1420×(22–30) мм это отношение составляет 1,5–2,1 %. При моделировании формовки на комплексе Gleeble часть образцов подвергали дополнительному растяжению со степенью деформации 2 % (имитация деформации наружного слоя), а другую

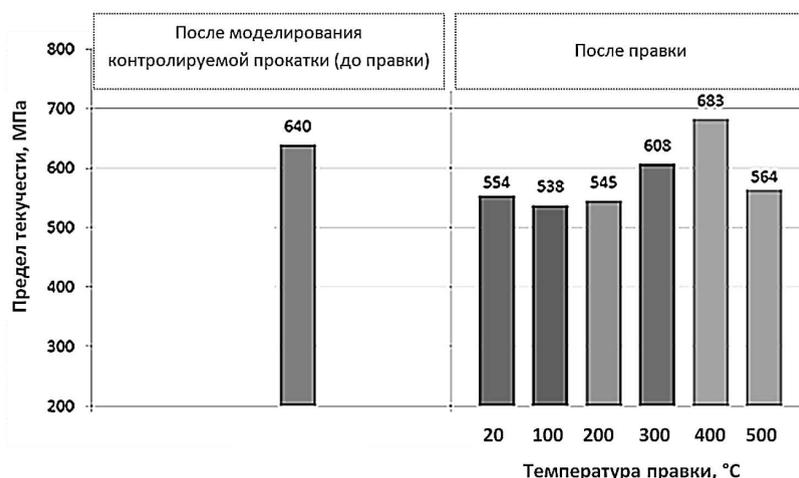


Рис. 4. Изменение предела текучести стали при 20 °С после правки при различных температурах

часть — сжатию со степенью деформации 2 % (для имитации поведения внутренних слоев).

После формовки и сварки трубы происходит ее *экспандирование* — раздача трубы по диаметру для выравнивания формы и частичного снятия сварочных напряжений. Металл при этом подвергается тангенциальным растягивающим деформациям (степень деформации 0,8 %, скорость $0,005 \text{ с}^{-1}$). Именно эти режимы обработки были реализованы на образцах после моделирования формовки. Поскольку при формовке листа и экспандировании по сечению трубы возникают различные виды напряженно-деформированного состояния, внешние и внутренние слои материала приобретают отличные друг от друга механические свойства. Рис. 5 демонстрирует изменение

свойств стали при формовке и экспандировании (суммарный эффект) для образцов, прокатанных по одному режиму, но правленных при разных температурах. На рис. 5 также отражены свойства образцов после моделирования горячей прокатки и правки, чтобы сравнить со свойствами материала трубы. Представленные механические свойства получены в результате испытаний на растяжение на модуле Pocket Jaw комплекса Gleeble 3800 (скорость деформации $d\varepsilon/dt = 0,01 \text{ с}^{-1}$).

По рис. 5 видно, как изменяются механические свойства трубы после трубного передела из листа:

предел текучести возрастает в среднем на 170 МПа для внешних слоев трубы и на 90 МПа для внутренних;

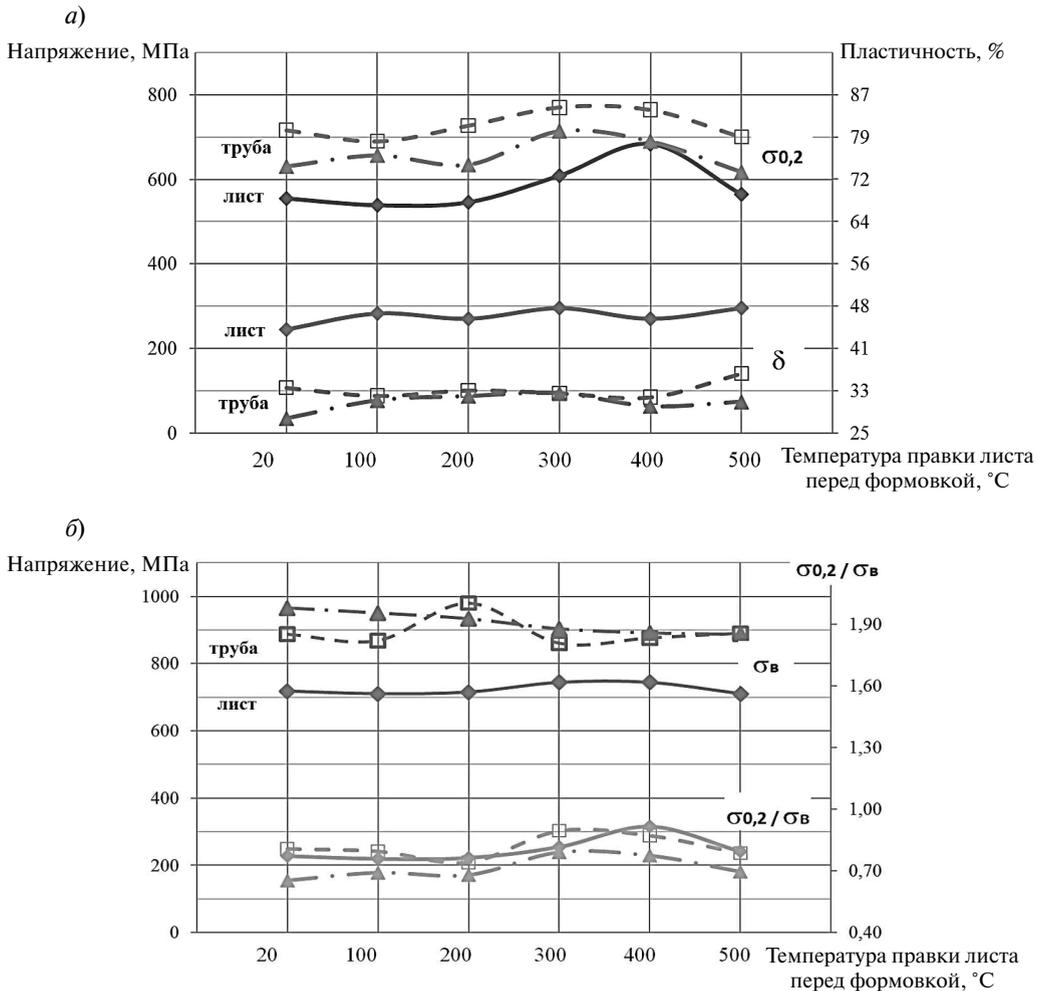


Рис. 5. Изменения предела текучести и сужения в шейке (а), предела прочности и отношения σ_T/σ_B (б) после моделирования формовки и экспандирования в зависимости от температуры правки листа после прокатки (— лист; - - - - внешние слои трубы; — · — · — внутренние слои трубы)

предел прочности повышается в среднем на 200 МПа для внешних слоев трубы и на 230 МПа для внутренних;

пластичность падает в среднем на 16 % для внешних слоев трубы и на 19 % для внутренних;

отношение предела текучести к пределу прочности возрастает в среднем на 0,02 единиц для внешних слоев трубы и снижается на 0,11 единиц для внутренних.

Физическое моделирование *термического цикла нанесения покрытий* проводили после имитации формовки и экспандирования на тех же образцах. Образцы нагревали до температуры 225 °С со скоростью 1 °С/с, выдерживали 20 мин и охлаждали до комнатной температуры со скоростью 1 °С/с.

На рис. 6 представлены зависимости от температуры правки металла после контролируемой прокатки свойств исследуемой стали по стадиям передела.

На рис. 6 для стадий «изготовление трубы» и «нанесение покрытий на трубу» приведены средние арифметические значения механических свойств по толщине стенки трубы, т. е. среднее арифметическое свойств внешних

и внутренних слоев трубы. По графикам видно, что все последовательные стадии изготовления штрипса и трубы влияют на ее конечные свойства. Особенно заметно влияние правки горячекатаного листа, которая в зависимости от температуры может вызывать либо понижение, либо повышение прочностных свойств при неизменных параметрах других процессов изготовления листа и трубы. Каждая из стадий передела вносит свой вклад в формирование конечных свойств металла трубы.

Анализ данных, представленных на рис. 6, позволяет сформулировать следующие выводы:

Правка при всех температурах от 20 до 500 °С может снижать предел прочности на 200 МПа и предел текучести горячекатаного штрипса на 100 МПа.

Последующие операции формовки и экспандирования в совокупности способствуют повышению предела прочности и предела текучести до уровня свойств исходного штрипса.

Дальнейшая операция нанесения полимерного покрытия может повышать предел текучести на 80 МПа и не существенно влияет на предел прочности при всех температурах правки.

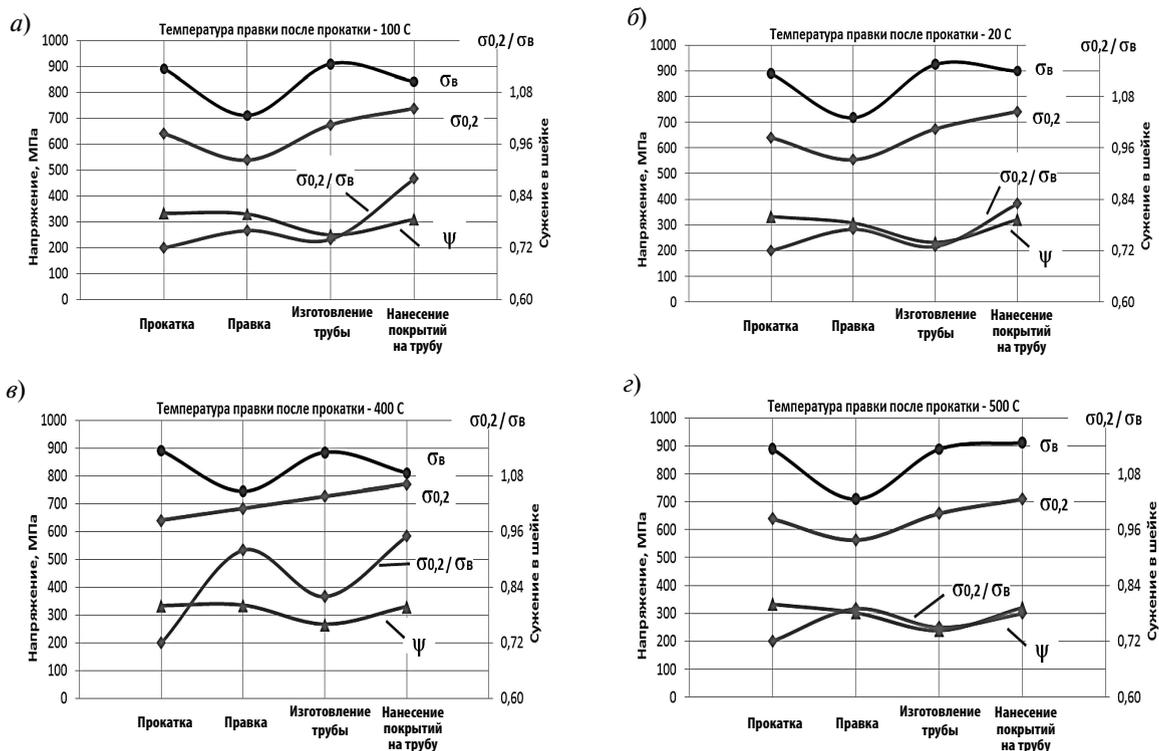


Рис. 6. Свойства металла по стадиям передела при изготовлении трубы для различных температур правки после контролируемой прокатки: а — 20 °С; б — 100 °С; в — 400 °С; з — 500 °С

Относительное сужение в шейке, являющееся характеристикой пластических свойств, практически не зависит от режима правки и снижается лишь при формовке и экспандировании, а после термического цикла нанесения полимерного покрытия повышается до уровня исходного горячекатаного штрипса.

Термический цикл нанесения полимерных покрытий на трубу вызывает повышение предела текучести стали на 75–80 МПа. Это, очевидно, связано с закреплением подвижных дислокаций, генерированных при формовке и экспандировании трубы, внедренными атомами углерода.

Разработанная методика «растяжение — сжатие» для физического моделирования на

комплексе Gleeble-3800 и использование специальных образцов, сохраняющих устойчивость пластической деформации на протяжении многих циклов деформации растяжением — сжатием, позволили выполнить имитацию всего цикла производства труб большого диаметра, включая операции контролируемой прокатки, ускоренного охлаждения, правки, формовки трубы, экспандирования и термический цикл нанесения полимерного покрытия. Таким образом, открывается возможность физического моделирования технологий многостадийных процессов горячей деформации, например контролируемой прокатки толстого листа, что позволяет определить вклад каждой стадии обработки металла в формирование конечной структуры и механических свойств металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kostrzyhev A.G., Strangwood M.** Bauschinger Effect in Microalloyed Steels: Part I. Dependence on Dislocation-Particle Interaction // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2010. Vol. 41, № 6.
2. **Han K., Van Tyne C.J.** Effect of Strain and Strain Rate on the Bauschinger Effect Response of Three Different Steels // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005. Vol. 36, № 9.
3. **Ralnepuli R.C., Cortes C.O.S.** A method of calculating Bauschinger effect in API linepipe steels // *Mech. and Steel Processing. 28th Mech. Working and Steel Processing. Conf. of Iron and Steel Society, AIME*. 1987. Vol. 24.
4. **Li Zhonghua, Gu Haicheng.** Bauschinger effect and residual phase stresses in two ductile-phase steels: Part I. The influence of phase stresses on the Bauschinger effect // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1990. Vol. 21, № 2.
5. **Bezobrazov Y.A., Kolbasnikov N.G., Naumov A.A.** High Strength Dual-Phase Steel Structure Evolution During Hot Rolling // *Materials Science & Technology.— 2012 Conference & Exhibition (MS&T'12), Thermal and Thermomechanical Processing Session.— Pittsburgh, PA, USA.— P. 1054–1061.*
6. **Naumov A.A., Bezobrazov Y.A., Kolbasnikov N.G., Chernikov E.V.** Novel Physical Simulation Technique Development for Multistage Metal Plastic Deformation Processing // *Materials Science Forum.— 2013. Vol. 762.— P. 62–69.*
7. **Колбасников Н.Г., Безобразов Ю.А., Наумов А.А.** Эволюция структуры высокопрочной двухфазной стали при горячей прокатке // *Сталь*. №7. 2013. С. 73–79.
8. **Колбасников Н.Г., Зотов О.Г., Мартяшов И.С., Сулягин Р.В.** Исследование эффекта Баушингера, физическое моделирование формирования свойств микролегированной стали в процессе изготовления труб // *Сталь*. 2012. №8. С. 56.
9. **Васильев А.А., Соколов Д.Ф., Колбасников Н.Г., Соколов С.Ф., Немтинов А.А.** Моделирование микроструктуры и механических свойств стального листа после прокатки на стане 2000 ОАО «Северсталь» // *Вопросы материаловедения*. 2010. №3 (63). С. 16–27.
10. **Безобразов Ю.А., Колбасников Н.Г., Наумов А.А.** Подтверждение методики растяжение-сжатие для физического моделирования процессов многостадийной пластической деформации металлов // *Сб. трудов: СММТ 2013. Санкт-Петербург, 2013. С. 305–307.*

REFERENCES

1. **Kostrzyhev A.G., Strangwood M.** Bauschinger Effect in Microalloyed Steels: Part I. Dependence on Dislocation-Particle Interaction. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2010. Vol. 41, № 6.
2. **Han K., Van Tyne C.J.** Effect of Strain and Strain Rate on the Bauschinger Effect Response of Three Different Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005. Vol. 36, № 9.
3. **Ralnepuli R.C., Cortes S.O.S.** A method of calculating Bauschinger effect in API linepipe steels. *Mech. and Steel Processing. 28th Mech. Working and Steel Processing. Conf. of Iron and Steel Society, AIME*. 1987. Vol. 24.

4. **Li Zhonghua, Gu Haicheng.** Bauschinger effect and residual phase stresses in two ductile-phase steels: Part I. The influence of phase stresses on the Bauschinger effect. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1990. Vol. 21, № 2.

5. **Bezobrazov Y.A., Kolbasnikov N.G., Naumov A.A.** High Strength Dual-Phase Steel Structure Evolution During Hot Rolling. *Materials Science & Technology Conference & Exhibition (MS&T'12), Thermal and Thermomechanical Processing Session.*— Pittsburgh, PA, USA. P. 1054–1061.

6. **Naumov A.A., Bezobrazov Y.A., Kolbasnikov N.G., Chernikov E.V.** Novel Physical Simulation Technique Development for Multistage Metal Plastic Deformation Processing. *Materials Science Forum*. 2013. Vol. 762. P. 62–69.

7. **Kolbasnikov N.G., Bezobrazov Yu.A., Naumov A.A.**

Evolutsiia struktury vysokoprochnoi dvukhfaznoi stali pri goriachei prokatke. *Stal'*. 2013. №7. S. 73–79. (rus.)

8. **Kolbasnikov N.G., Zotov O.G., Martiashov I.S., Suliagin R.V.** Issledovanie effekta Baushingera, fizicheskoe modelirovanie formirovaniia svoystv mikrolegirovannoi stali v protsesse izgotovleniia trub. *Stal'*. 2012. №8. S. 56. (rus.)

9. **Vasil'ev A.A., Sokolov D.F., Kolbasnikov N.G., Sokolov S.F., Nemtinov A.A.** Modelirovanie mikrostruktury i mekhanicheskikh svoystv stal'nogo lista posle prokatki na stane 2000 OAO «Severstal'». *Voprosy materialovedeniia*. 2010. №3 (63). S. 16–27. (rus.)

10. **Bezobrazov Yu.A., Kolbasnikov N.G., Naumov A.A.** Podtverzhdenie metodiki rastiazhenie-szhatie dlia fizicheskogo modelirovaniia protsessov mnogostadiinnoi plasticheskoi deformatsii metallov. *Sb. trudov: SMMT* 2013. Sankt-Peterburg, 2013. S. 305–307. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЗОБРАЗОВ Юрий Алексеевич — аспирант кафедры пластической обработки металлов ИММиТ 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

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