

УДК 66.546.3

*В.А. Лунев, И.А. Шишов,  
П.А. Глухов, А.А. Беляев*

## ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ПРИ ПРОКАТКЕ ТОЛСТОГО ЛИСТА НА СТАНЕ 5000.

### Часть 1: ТЕПЛОПТЕРИ НА ОПЕРАЦИЯХ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ПРОКАТКЕ

**Постановка задачи.** При разработке компьютерных программ расчета и оптимизации режимов обжаты для прокатных станов необходима информация об энергосиловых параметрах прокатки. За основу расчетов усилий и моментов принимают экспериментальные сведения о сопротивлении деформации, зависящем от степени, скорости деформации и температуры,  $K(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ . Эти зависимости могут быть получены с достаточно высокой точностью на современных испытательных комплексах, например с использованием термомеханического симулятора Gleeble-3800 [1]. Корректное использование данных о значениях  $K(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$  для расчета силы прокатки может быть обеспечено только при достоверной информации о распределении температур по объему деформируемого тела и о геометрии очага деформации. Особенно важны эти сведения при прокатке толстого листа, поскольку для этого случая распределения температур и деформаций крайне неравномерны по сечению проката.

Во многих работах отмечается, что изменение температуры толстого листа и особенности геометрии очага деформации при прокатке существенно зависят от характеристик оборудования станом, например от параметров работы установки гидросбива окалины [2], поэтому автоматический перенос существующих формул для расчета температур и уширения с одного стана на другие практически невозможен.

В предлагаемой статье рассматривается задача получения алгебраических соотношений для расчета среднемассовой температуры толстого листа во взаимосвязи со временем процесса при транспортировке сляба от нагревательной печи к клетке прокатного стана. Полученные соотношения должны быть при-

годны для использования в online-режиме работы системы управления станом (режим работы с регулировкой технологических параметров непосредственно в ходе прокатки).

**Экспериментальная часть.** Задача решалась при помощи пакета конечно-элементного моделирования Deform-3D. Охлаждаемый сляб был разбит на более чем 150000 конечных элементов. При этом 20 элементов располагались по высоте сляба, 75 элементов — по ширине и 100 — по длине. Расчеты выполнены для стали 10Г2ФБ, теплофизические свойства которой представлены в [3]. Для правильного решения тепловой задачи и поиска распределения температуры по объему металла с использованием конечно-элементной программы необходимо задать граничные условия в виде полей температур сляба на различных его поверхностях. Замеры температур выполняли в производственных условиях при помощи заводских и переносных ручных пирометров. Массив экспериментальных данных по температурам поверхности металла обрабатывали статистически; затем полученные зависимости вносили в программу Deform-3D, которая выполняла расчеты распределения температуры по объему металла путем решения уравнения теплопроводности. Среднемассовую температуру сляба в сечении определяли при помощи встроенной в Deform-3D специальной подпрограммы. Всего была обработана информация по температуре 23 слябов толщиной 315 мм и 28 слябов толщиной 250 мм. Температуру печного пространства в момент выдачи металла определяли при помощи печной термомпары, температуру верхней поверхности металла перед клетью — стационарным пирометром клетки, температуры верхней и нижней поверхностей при кантовке сляба после гидросбива — ручными переносными пирометрами.

Начальный градиент температур сляба при выдаче из печи не учитывали, поскольку проведенные ранее промышленные замеры температур по толщине находящегося в печи сляба подвижными термопарами показывали разницу температур поверхностных и центральных слоев не более 10–15 °С. Тепловые потери исследовали по трем участкам — при транспортировке от печи до гидросбива, при гидросбиве, при транспортировке от гидросбива до прокатной клетки. Зависимости поверхностной температуры искали как функцию времени.

Аппроксимирующие функции для температуры поверхности слябов при транспортировке и гидросбиве выбирали в соответствии с рекомендациями [2]. Статистические характеристики полученных регрессий (в частности, коэффициент детерминации  $r^2$ ) свидетельствуют о линейной зависимости потерь поверхностной температуры от основных технологических параметров в исследуемых интервалах. Получены зависимости потерь температуры от времени транспортировки в градусах (°С):

на участке от печи до гидросбива для верхней поверхности сляба

$$\Delta T_{\text{изл в}} = -24,64 + 0,0022 \left( \frac{T}{100} \right)^4 + 0,8963t, \quad (1)$$

где  $t$  — время транспортировки;

то же для нижней поверхности

$$\Delta T_{\text{изл н}} = \Delta T_{\text{изл в}} + 0,278 t, \quad (2)$$

на участке гидросбива для верхней и нижней поверхностей

$$\Delta T_{\text{гс}} = 120 - 0,615(H - 250), \quad (3)$$

где  $H$  — толщина сляба;

на участке транспортировки от гидросбива до прокатной клетки для верхней поверхности

$$\Delta T_{\text{в}} = 0,0183T + 0,562t, \quad (4)$$

для нижней поверхности

$$\Delta T_{\text{н}} = \Delta T_{\text{в}} + 0,278t. \quad (5)$$

Так, к примеру, за время транспортировки слябов от нагревательной печи до прокатной клетки, равное 130 с, потери поверхностной температуры сляба составляют 227 °С для верхней поверхности и 267 °С — для нижней. Более высокие потери на нижней поверхности сляба вызваны дополнительным захлаживанием при контакте с роликами ролланга.

**Расчет распределения температур по объему сляба при помощи программы Deform-3D.** Задавая температуру поверхности при помощи найденных зависимостей от времени, регулировали температурные потери путем задания поверхностного отрицательного теплового потока (*Heat Flux*). Поток подбирали до тех пор, пока средняя температура в заданной точке поверхности, полученная в результате расчета по программе *Deform-3D*, не совпадала с граничными температурами по всем поверхностям.

Распределение температуры по объему сляба после 153 секунд с момента выдачи из печи представлено на рис. 1. Видно, что сляб имеет массивное ядро, которое почти не теряет температуры при транспортировке металла к прокатной клетки, и захлаженные приповерхностные слои, так называемые «корочки», температура которых значительно ниже по сравнению с ядром. Средние значения поверхностных температур, рассчитываемые программой *Deform*, составляют  $T_{\text{в}} = 995$  °С;  $T_{\text{н}} = 963$  °С. Эти значения практически совпадают с поверхностными температурами, определенными при помощи соотношений (1)–(5).

Распределение температур по сечению сляба на различных стадиях подачи к прокатной клетки представлено на рис. 2. На рисунке отчетливо видно наличие ядра и корочек и их изменение при подходе металла к клетки — с течением времени температура ядра практически не изменяется, но толщина корочек возрастает. Это распределение

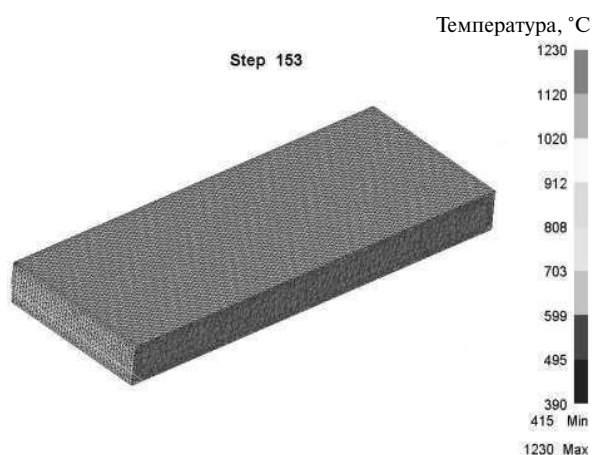


Рис. 1. Распределение температур по сечению сляба (разрез посередине длины сляба) толщиной 315 мм после транспортировки к гидросбиву в течение 153 с

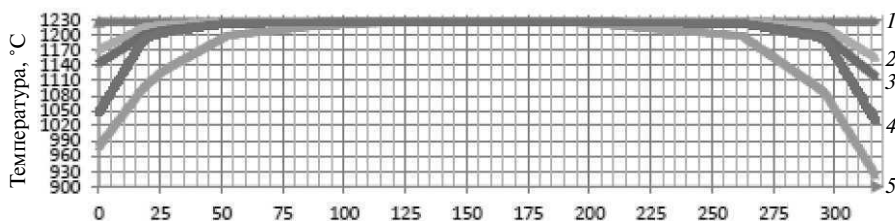


Рис. 2. Распределение температуры по толщине (0–315 мм) сляба в различных сечениях на различных стадиях подачи к прокатной клети:

1 — выдача слитка из нагревательной печи; 2 — при транспортировке к камере гидросбива; 3 — перед камерой гидросбива; 4 — после камеры гидросбива; 5 — перед началом прокатки

температур и его изменение в процессе черновой прокатки достаточно важны для процессов структурообразования и формирования свойств микрорегулированных сталей. Суть в том, что выделение карбонитридов ниобия и ванадия, зависящее от их концентрации и стимулированное пластической деформацией, происходит обычно при 910–950 °C [1]. Этот вид упрочнения вероятнее всего начнется в приповерхностных участках сляба, что может вызвать существенное увеличение сопротивления деформации и, естественно, возрастание энергосиловых параметров прокатки.

Важным результатом выполненных расчетов можно считать получение исходного поля температур сляба непосредственно перед прокаткой, которое будет начальным условием для расчета изменения температур сляба при черновой прокатке.

**Взаимосвязь среднемассовой температуры сляба с температурой его поверхности.** По рис. 1 видно, что наиболее захлажденными местами являются кромки и торцы сляба. В момент захвата металла валками на захлажденных торцах и кромках возникают наибольшие усилия прокатки, поэтому информация о распределении среднемассовой температуры по длине и ширине листа необходима для оценки пиковых значений энергосиловых параметров.

Для оценки распределения температуры по объему металла анализировали температуры в девяти сечениях по длине и ширине сляба: по длине рассматривали передний конец, среднюю часть полосы и хвостовую; по ширине — среднюю часть и кромки. Все периферийные сечения принимали на расстоянии 100 мм от края сляба.

На рис. 3, а–в представлены графики изменения среднемассовой температуры начиная от выдачи из печи и до начала прокатки во взаи-

мосвязи со временем для передней и средней частей сляба 315 мм. Видно, что на переднем конце полосы среднемассовая температура сляба понижается на 177 °C, а средней части — на 50 °C. По графикам на рис. 3 также видно, что зависимость падения среднемассовой температуры с течением времени при транспортировке сляба к прокатной клети можно считать линейной. Наряду с расчетными зависимостями среднемассовой температуры от времени, полученными расчетным путем при помощи программы *Deform-3D*, показаны линейные аппроксимации, которые для отдельных стадий перемещения металла от печи до прокатной клети имеют вид (для всех зависимостей  $T_0$  — начальная среднемассовая температура операции):

на участке от печи до гидросбива для средней части сляба

$$\Delta T = -0,1626 t + T_0; r^2 = 0,9996; \quad (6)$$

$$\Delta T = -0,4303 t + T_0; r^2 = 0,9985; \quad (7)$$

то же для передней части сляба;

на участке гидросбива окалины для средней части сляба

$$\Delta T = -0,9601 t + T_0; r^2 = 0,9999, \quad (8)$$

$$\Delta T = -5,1482 t + T_0; r^2 = 0,8683; \quad (9)$$

а для передней части сляба на участке транспортировки от гидросбива до прокатной клети для средней части сляба

$$\Delta T = -0,3154 t + T_0; r^2 = 0,997, \quad (10)$$

то же для передней части сляба

$$\Delta T = -1,1586 t + T_0; r^2 = 0,9912. \quad (11)$$

**Проверка адекватности полученных моделей.** Сложность проверки адекватности полученных моделей заключалась в невозможности прямых

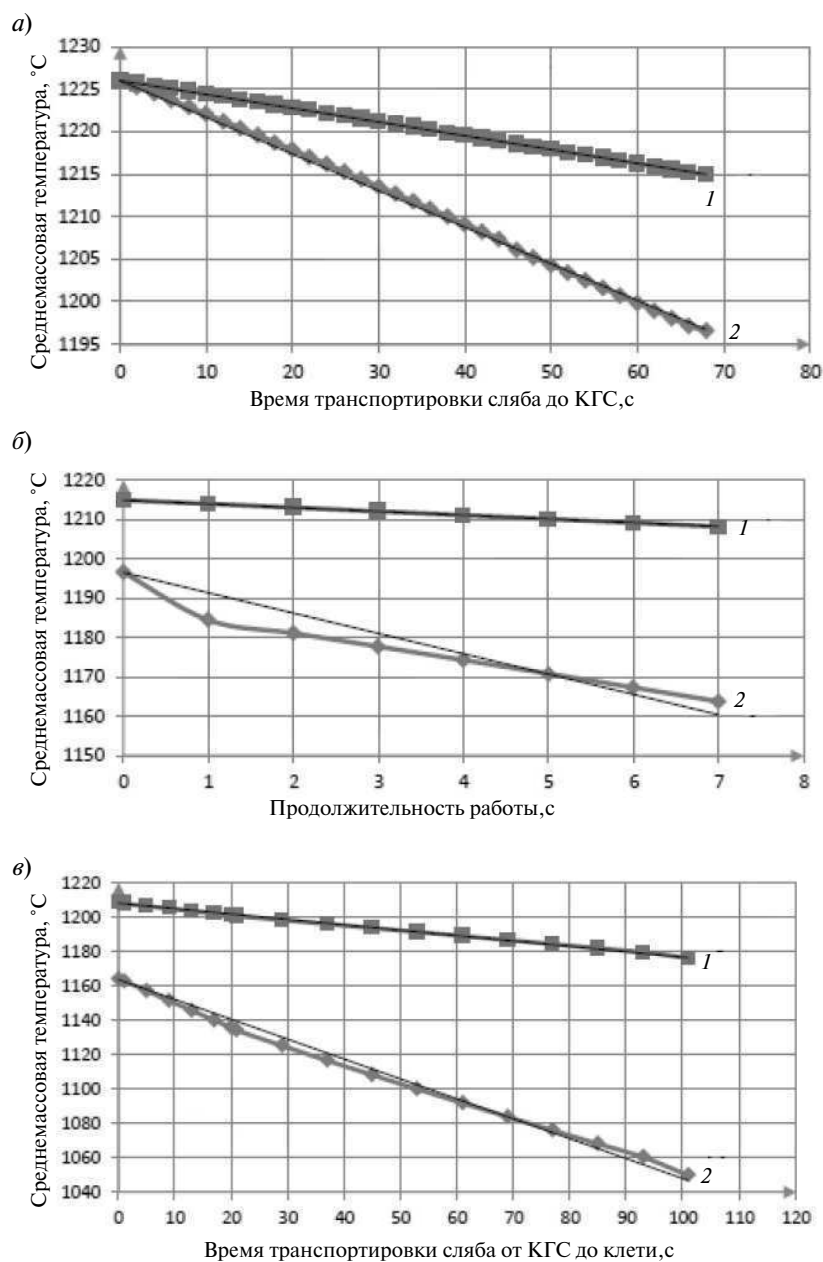


Рис. 3. Зависимости изменения среднемассовой температуры от времени при подаче слэба от нагревательной печи до прокатной клетки по участкам:

*a* — от печи до камеры гидросбива; *б* — в камере гидросбива; *в* — от камеры гидросбива до прокатной клетки; 1 — средняя часть слэба; 2 — передняя часть

замеров среднемассовой температуры для сравнения расчетных и экспериментальных данных. Среднемассовую температуру оценивали косвенным путем на основании зависимости от нее сопротивления деформации металла и, как следствие, усилия прокатки. Рассчитанную по зависимостям (6)–(11) конечную среднемассовую

температуру слэба после прохождения им предварительных операций использовали для расчета усилия прокатки в первом, черновом, проходе. В этом случае совпадение расчетного и экспериментального значения усилий прокатки в первом проходе будет говорить об адекватности полученных моделей.

Для анализа черновой прокатки в пакете *Deform-3D* была создана конечноэлементная модель (рис. 4), в которую были заложены реальные геометрические, временные, температурные, скоростные и деформационные параметры процесса черновой прокатки. Модель сляба — пластичное тело, свойства которого задавали кривыми пластического течения, полученными экспериментально на комплексе Gleeble—3800 для стали марки 10Г2ФБ [4]. Также в модель закладывали упругие характеристики и теплофизические свойства данной стали, взятые по справочным данным [2]. Модель калибровали по температуре (за счет подбора соответствующих коэффициентов теплоотдачи и теплопоток) так, чтобы поверхностные температуры в контрольных точках совпадали с показаниями пирометров.

Усилие прокатки в первом пропуске для слябов различной толщины, имеющих различные температуры выдачи и времена предварительных операций, рассчитывали с помощью стандартной подпрограммы пакета *Deform-3D*, позволяющей строить графики усилия прокатки в зависимости от времени (рис. 5).

На рис. 5 хорошо видны пиковые усилия, возникающие при прокатке захолованных торцов в моменты захвата и выброса. Полученные графики усредняли по методике, используемой технологами стана, а именно учитывали только усилие установившегося процесса прокатки. Полученные средние значения усилий (21980 кН

на верхнем валке, 21560 кН на нижнем валке) хорошо согласуются с непосредственно измеренным значением усилия 21780 кН.

Основной недостаток расчета усилий при помощи *Deform-3D* — невозможность его применения в системе автоматического управления станом из-за большого времени расчета (4–6 часов для одного прохода при использовании вычислительного сервера с двумя 6-ядерными процессорами CPU Intel E 5645 2400 ГГц), поскольку расчет всего цикла прокатки должен занимать не более 2 секунд. Поэтому для расчета усилия прокатки использовали также методику, изложенную в [4], способную обеспечить требуемое быстродействие. В этой методике для определения усилия прокатки используются соотношения:

для усилия прокатки

$$P_{\text{пр}} = p_{\text{ср}} b_{\text{ср}} l, \quad (12)$$

где площадь контактной площадки  $F_{\text{к}} = b_{\text{ср}} l$  вычисляется как произведение средней ширины очага  $b_{\text{ср}} = 0,5(b_0 + b_1)$  и длины дуги захвата  $l = \sqrt{R\Delta h}$ ;

для среднего давления металла на валки

$$p_{\text{ср}} = n_3 n_{\sigma} K, \quad \text{кН/м}^2, \quad (13)$$

где  $K$  — сопротивление металла деформации, МПа;  $n_3$  и  $n_{\sigma}$  — коэффициенты подпора и влияния трения, определяются в зависимости от формы очага деформации  $l/h_{\text{ср}}$ ; для первого прохода можно принять  $n_{\sigma} = 1$ , поскольку очаг деформации — высокий [4], а  $n_3 = 2 - \sqrt{l/h_{\text{ср}}}$ .

Сопротивление металла деформации рассчитывали по методике [1], реализованной в виде программы *AusEvol+*, созданной на основании обширной базы данных для микрولةгированных трубных сталей («химический состав — параметры обработки — структура — свойства»)\*. Методика позволяет при известных значениях температуры, степени, скорости деформации и размере исходного зерна аустенита, найти сопротивление деформации. На рис. 6. показано сравнение рассчитанных по методике [1] и полученных экспериментально на комплексе

\* Государственный контракт № 02.740.11.0822 на выполнение научно-исследовательских работ «Управление структурой и свойствами трубных микрولةгированных сталей при прокатке толстого листа с использованием методов физического и математического моделирования» (шифр заявки «2010-1.1-233-068-003»)

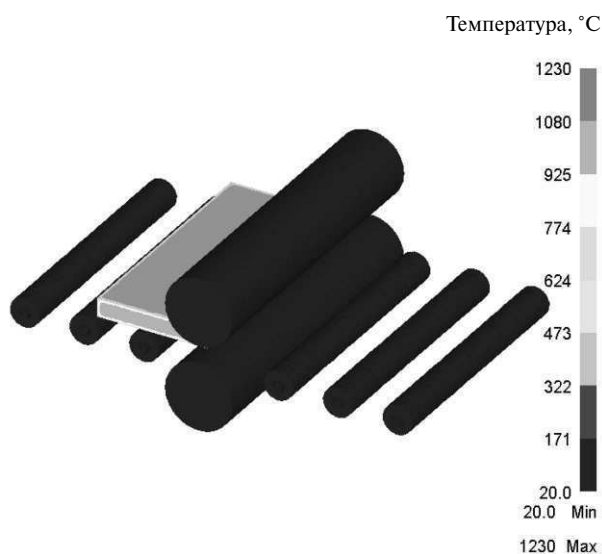


Рис. 4. Конечноэлементная модель процесса прокатки на стане 5000 ОАО «Северсталь»

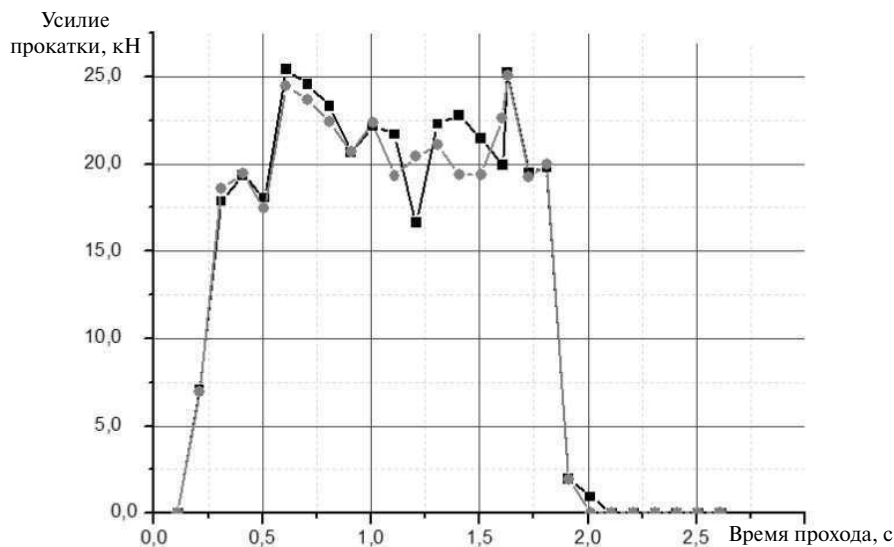


Рис. 5. Графики зависимости сил, действующих на валки стана в первом проходе при прокатке сляба толщиной  $h_0 = 250$  мм, шириной  $b_0 = 1840$  мм с абсолютным обжатием  $\Delta h = 26,9$  мм:  
 —■— — верхний валок; —●— — нижний валок

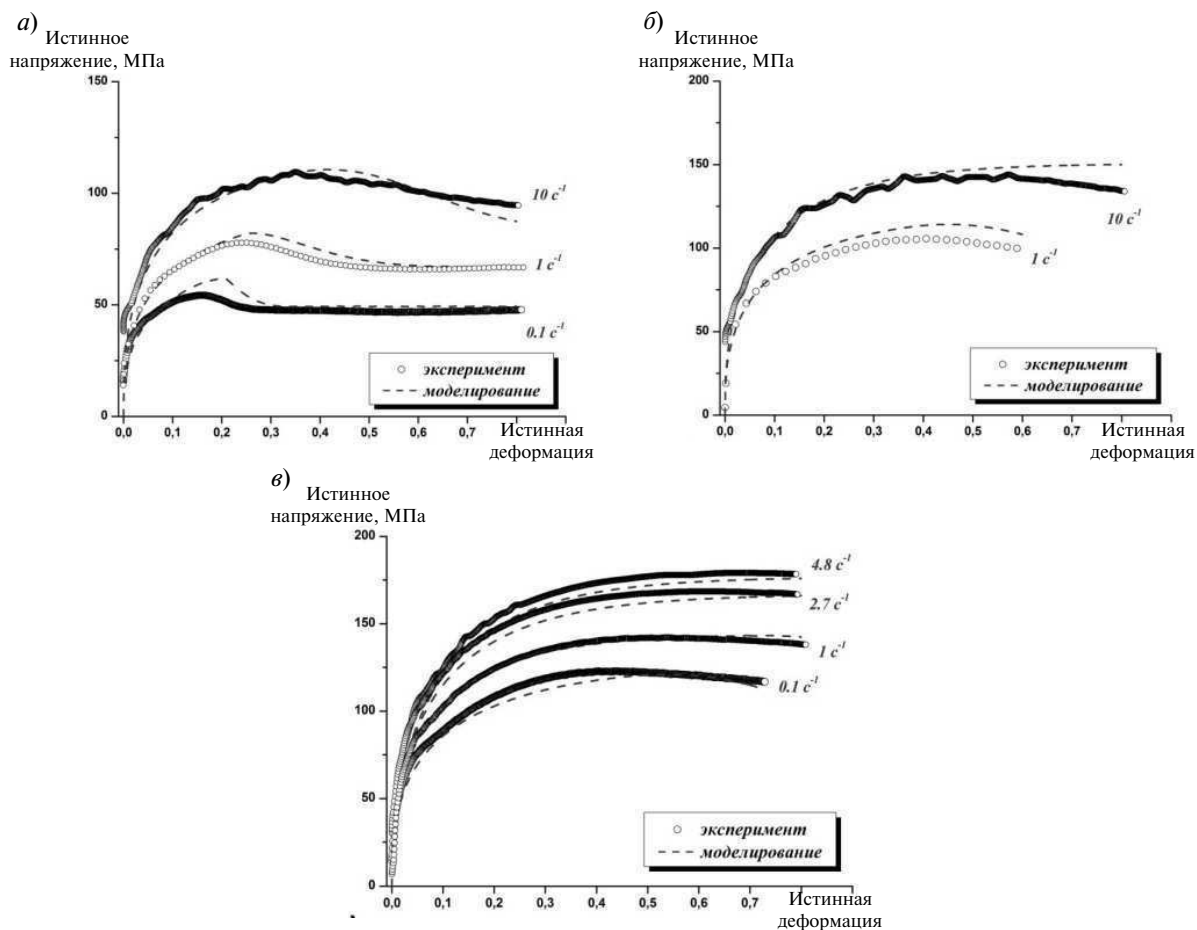


Рис. 6. Экспериментально измеренные на комплексе Gleeble — 3800 и рассчитанные по методике [1] кривые пластического течения при разных температурах: а — 1200 °C; б — 1100 °C; в — 1000 °C

Сравнение расчетных и фактических усилий прокатки

Толщина сляба, мм	$T_{\text{выдачи}},$ $^{\circ}\text{C}$	Время транспортировки от печи до клетки, с	Обжатие в первом проходе, мм	Исходная ширина сляба, мм	$T_{\text{ср.расч.}}$ перед клетью, $^{\circ}\text{C}$	$P_{\text{расч}},$ кН	$P_{\text{экспер}},$ кН	$\Delta, \%$
250	1251	129	26,9	1840	1178	22900	21780	5
250	1214	168	33,5	1820	1168	29996	29597	1,3
313	1200	132	46,5	1850	1166	35380	33160	7
313	1200	128	46,8	1840	1165	36370	33310	9

Gleeble-3800 кривых пластического течения для микролегированной трубной стали, содержащей, %, 0,08 С, 0,2 Si, 1,47 Mn, 0,19 Mo, 0,042 Nb, 0,01 Ti, 0,064 V. По соотношениям (12), (13) определяли усилие прокатки  $P_{\text{расч}}$ , которые сравнивали с экспериментальными значениями усилий  $P_{\text{эксп}}$ , непосредственно измеренными на стане (см. табл.). В качестве температуры металла, непосредственно находящегося в очаге деформации, условно принимали среднюю температуру сляба перед началом прохода.

По данным таблицы видно, что ошибка расчета усилия прокатки не превышает 9 %. Следовательно, данная методика дает хороший результат и пригодна для внедрения в систему автоматического управления станом. Важным результатом также является возможность оценить среднюю температуру уже в процессе черновой и чистовой прокатки, решая обратную задачу — определение температуры на основании известных значений степени, скорости деформации и усилия прокатки. Решение обратной задачи дает возможность корректировки расчетной температуры непосредственно в процессе прокатки на основании усилия прокатки, измеренного в предыдущем проходе.

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

Все потери поверхностных и среднемассовых температур на этапе предварительных операций в узком диапазоне параметров, характерных непосредственно для стана-5000, хорошо описываются простыми линейными зависимостями, пригодными для внедрения в систему автоматического управления станом с online-режимом работы.

Сляб остается толстым (в теплофизическом плане) телом на протяжении всех технологических операций его транспортировки от нагревательной печи до прокатной клетки. Для него характерно наличие небольших захлаженных поверхностных корочек и массивного равномерно нагретого ядра, обладающего высокой инертностью, слабо реагирующего на внешние тепловые возмущения.

Используя значения средней массовой температуры, рассчитанные по предложенным выражениям, можно достоверно определить усилие прокатки в первом черновом проходе. Вычисленную температуру можно использовать в качестве начального условия расчета циклов черновой и чистовой прокатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rudskoy, A. Experimental Investigation and Modeling of Austenite Microstructure Evolution Processes Occurring in Line-pipe Steels under Hot Rolling [Текст] / A. Rudskoy, A. Vasilyev, N. Kolbasnikov, S. Sokolov, D. Sokolov // HUTNAD.— Spolka.— 2011. Vol. 78.— № 5.— P. 344–475.  
2. Коновалов, Ю.В. Расчет параметров листовой прокатки [Текст]: Справочник / Ю.В. Коновалов, А.Л. Оста-

пенко, В.И. Пономарев.— М.: Металлургия, 1986.  
3. Марочник сталей и сплавов [Текст]: Справочник / Ред. В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; под общ. ред. В.Г. Сорокина.— М.: Машиностроение, 1989.— 640 с.  
4. Рудской, А.И. Теория и технология прокатного производства [Текст] / А.И. Рудской, В.А. Лунев.— СПб.: Наука, 2008.— 527 с.