



УДК 66.546.3

*Н.Г. Колбасников, И.А. Шишов,
П.А. Глухов, А.А. Беляев*

ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ПРИ ПРОКАТКЕ ТОЛСТОГО ЛИСТА НА СТАНЕ 5000.

Часть 2: ТЕПЛОПТЕРИ НА ЭТАПАХ ЧЕРНОВОЙ ПРОКАТКИ, ПОДСТУЖИВАНИЯ, ЧИСТОВОЙ ПРОКАТКИ

N.G. Kolbasnikov, I.A. Shishov, P.A. Glukhov, A.A. Belyaev

THE HEAT LOSSES DURING PLATES ROLLING ON THE MILL 5000.

Part 2: THE HEAT LOSS DURING ROUGHING ROLLING STAGE, COOLING STAGE, FINISH ROLLING STAGE

В работе с помощью методов математического моделирования были исследованы теплотери раската при толстолистовой прокатке на стане 5000 ОАО «Северсталь» на этапах черновой прокатки, подстуживания, чистовой прокатки. Разработана быстродействующая методика вычисления среднемассовой температуры раската в каждом проходе.

ПРОКАТКА ТОЛСТОГО ЛИСТА. РАСЧЕТ СРЕДНЕМАССОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ЧЕРНОВАЯ ПРОКАТКА. ЧИСТОВАЯ ПРОКАТКА. ПОДСТУЖИВАНИЕ.

The heat losses during plates rolling on the mill 5000 JSC «Severstal» on the stages of rough rolling, cooling and finish rolling are investigated with the help of mathematical modeling methods. The high-speed method of the workpiece integral temperature calculating in each pass is developed.

ROLLING OF PLATES. CALCULATION OF INTEGRAL TEMPERATURE. MATHEMATICAL MODELING. ROUGHING ROLLING STAGE. FINISH ROLLING STAGE. COOLING STAGE.

Постановка задачи. Известно [1], что температурное поле раската существенно влияет на усилие и момент прокатки, прогнозирование которых чрезвычайно важно для управления процессом прокатки в автоматическом режиме. В работе [2] показано, что для инженерных расчетов энергосиловых параметров прокатки при заданном температурном поле в раскате допустима замена этого поля среднемассовой (среднеинтегральной) температурой; это хорошо согласуется с результатами промышленных экспериментов [3]. Отметим, что неравномерность распределения температур по сечению раската обусловлена в основном условиями нагрева сляба в печи, транспортировкой металла по рольгангу к прокатной клети, параметрами работы установки гидросбива окалины [1]. Таким образом, определение среднемассовой температуры раската, которую в условиях реальной

прокатки на стане измерить невозможно, в случае толстолистовой прокатки — весьма сложная задача.

Для расчета среднемассовых температур предложено большое количество инженерных формул [4], которые учитывают основные составляющие теплообмена (излучение, конвекция, теплоотдача в прокатные валки, ролики рольганга и т. д.) и источники тепловыделения, обусловленные работой пластической деформации, трением между полосой и валками, тепловыделениями при фазовых превращениях. Вывод этих зависимостей всегда основан на привязке к определенному стану, на котором проводились исследования, поэтому их применение на других толстолистовых станах практически невозможно. Кроме того, для использования в системах автоматического управления процессом прокатки зависимости должны обеспе-

чивать требуемое быстродействие расчета энергосиловых параметров (как правило, не более 2 секунд для расчета всего цикла прокатки).

Цель нашей работы — создание быстродействующей методики расчета падения среднemasсовой температуры в каждом проходе при прокатке толстого листа из трубной стали категории прочности K60 на стане 5000 ОАО «Северсталь», которая нужна для дальнейшего расчета энергосиловых параметров прокатки.

Выбор методики решения задачи. Известны два направления решения температурной задачи прокатки [4]. Одно из них базируется на теоретических зависимостях процесса теплопередачи, а другое — на статистическом анализе результатов экспериментальных исследований изменения температуры раскатов. Теоретический анализ предусматривает составление уравнений суммарного теплового баланса, расчет которого зачастую затруднен, поскольку отсутствуют строгие математические зависимости, которые бы описывали составляющие процесса теплопередачи. Предполагается, что теплофизические характеристики металла, такие как теплоемкость, плотность, коэффициенты теплопередачи и излучающая способность — величины постоянные. В реальных условиях эти коэффициенты могут изменяться в зависимости от температуры металла, состояния его поверхности, скорости прокатки. Принятые при таком подходе допущения могут вызывать значительные погрешности расчета среднemasсовой температуры.

Таким образом, большой практический интерес представляет второе направление — описание процессов теплопередачи статистическими зависимостями. При таком подходе статистическую модель температурных условий прокатки строят на основе результатов экспериментального изучения изменения температуры раскатов. При этом общая структура модели должна содержать в качестве аргументов основные параметры технологического процесса, легко поддающиеся контролю и регулированию. Погрешность расчета температуры прокатываемых полос по статистическим моделям определяют структура моделей (степень охвата варьируемых параметров и аргументированность их формы связи), а также чистота постановки эксперимента, на результатах которого они базируются. Статистические модели отражают

конкретные условия и соответствуют определенному диапазону изменения параметров прокатки, характерному для конкретного стана. Подобные модели успешно применяются на многих толстолистовых станах [4].

Для решения термдеформационных задач успешно применяют пакет моделирования Deform-3D, реализующий метод конечных элементов [5]. Ключевым преимуществом метода является возможность определения значений температуры в любой точке деформируемого тела, а также их усреднение по любому сечению и объему в целом, что позволяет определить среднemasсовую температуру. За счет решения одновременно температурной и деформационной задач учитывается возможная неравномерность деформации и ее влияние на температурное поле, что обеспечивает высокую точность и правдоподобность расчетов.

Однако метод конечных элементов имеет существенный недостаток — большое количество времени, необходимое для проведения расчетов, что делает невозможным его использование в системах автоматического управления.

С учетом изложенного для достижения поставленной цели задачу об изменении среднemasсовой температуры раската при прокатке на стане 5000 сначала решали с помощью метода конечных элементов, а для обеспечения требуемого быстродействия расчета энергосиловых параметров прокатки полученные результаты представляли в виде упрощенных статистических моделей потерь среднemasсовой температуры.

Постановка и решение термдеформационной задачи прокатки толстого листа на стане 5000 в пакете Deform-3D. Термдеформационную задачу прокатки толстого листа на стане 5000 решали с использованием пакета конечноэлементного моделирования Deform-3D и при помощи созданной конечноэлементной модели процесса прокатки, адаптированной применительно к условиям прокатки на стане 5000 [6]. В качестве начальных условий для моделирования приняли неравномерность температурного поля в слябе (рис. 1), возникшую вследствие прохождения им операций, предшествующих прокатке [6]. Моделировали прокатку пяти слябов с исходными толщинами 250 и 315 мм по различным режимам обжаты, характерным для стана 5000 (рис. 2).



Каждый проход и каждую паузу на реверс считали отдельными технологическими операциями.

По рис. 3 видно, что на этапе черновой прокатки температура поверхности раската, в отличие от этапа чистовой прокатки, ведет себя крайне нестабильно, что обусловлено воздействием на раскат ударов клетьевого гидросбива, попаданием на него воды из системы охлаждения валков и т. п. Это затрудняет правильное задание граничных условий моделирования, поскольку учесть указанные факторы в пакете Deform весьма сложно. Кроме того, пирометр, находящийся за клетью и измеряющий температуру конца нечетного прохода и начала четного на стадии черновой прокатки, работает в сложных условиях (наличие пара от воздействия на раскат ударов клетьевого гидросбива), и поэтому его замеры нельзя считать точными.

Дополнительно следует отметить, что среднemasовая температура прокатываемого сляба, особенно на этапе черновой прокатки, должна быть величиной значительно более инерционной и снижаться плавно по мере возрастания общей степени деформации, в отличие от температуры поверхности, изменение которой представлено на рис. 3.

Для оценки величины захлажденного вследствие удара клетьевого гидросбива поверхностного слоя в Deform-3D моделировали разогрев пластины, одна сторона которой захлажена до температуры конца прохода, где использовался гидросбив, а другая разогрета до температуры начала следующего прохода. К примеру, после первого чернового прохода поверхностная тем-

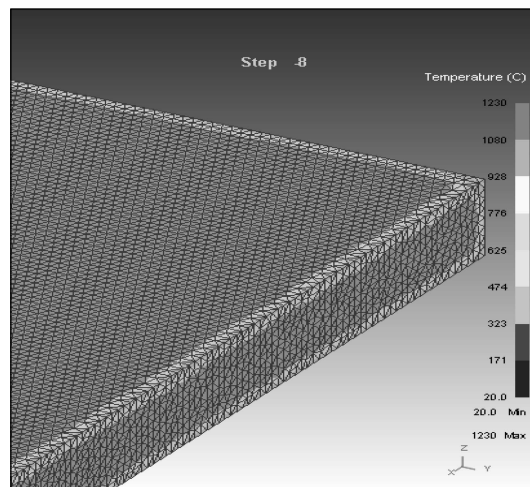


Рис. 1. Поле температур в слябе перед началом прокатки

пература раската упала с 980 °C до 910 °C (см. рис. 3), а после паузы на реверс длительностью 15 сек. к началу следующего прохода она возросла до 945 °C. Решая задачу теплопроводности в Deform-3D, возможно определить максимальную толщину пластины, при которой захлажденная верхняя поверхность с температурой 910 °C разогреется до температуры нижней поверхности 945 °C за время 15 сек. По результатам расчетов установлено, что толщина такой пластины не может превышать 4–5 мм. Следовательно, удар клетьевого гидросбива и вода, попадающая на раскат из системы охлаждения валков, оказывают влияние лишь на температуру тонкого поверхностного слоя (измеряет клетевой пирометр).

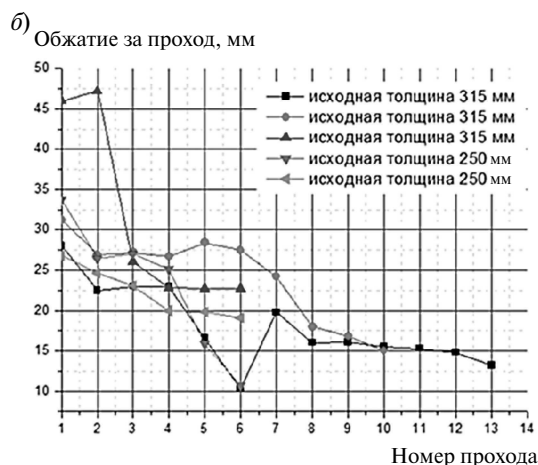
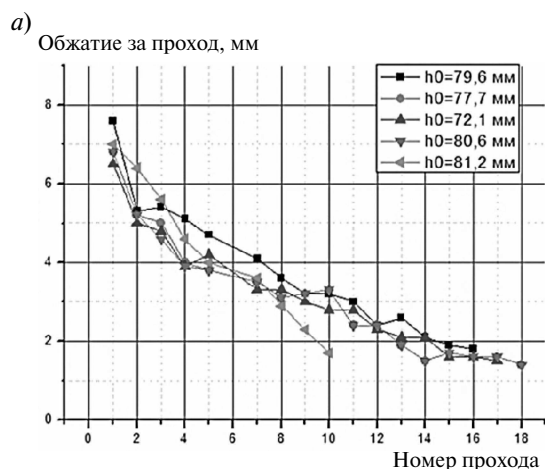


Рис. 2. Моделируемые режимы обжатий черновой (а) и чистовой (б) прокатки

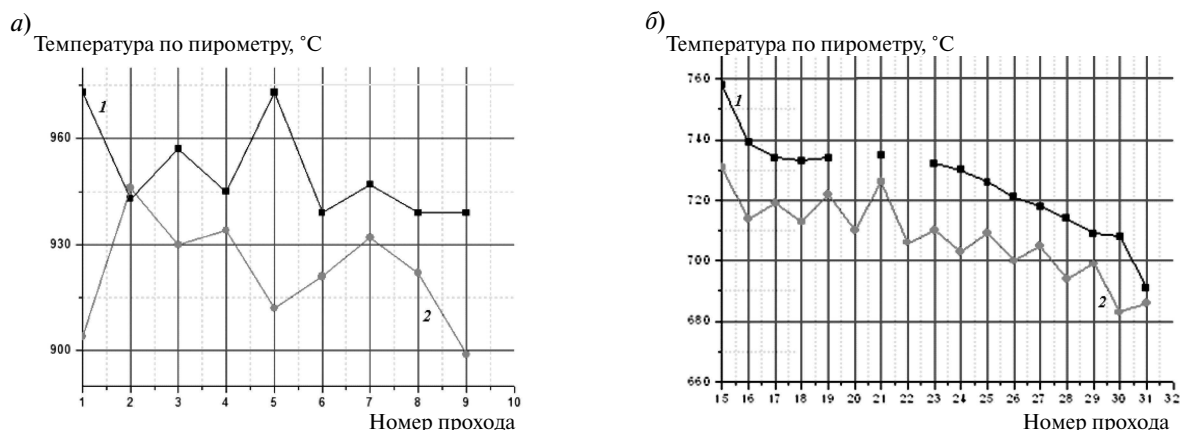


Рис. 3. Температуры поверхности раската по ходу прокатки по показаниям пирометров стана 5000 для чернового (а) и чистового (б) режимов прокатки: 1 — температура начала прохода; 2 — температура конца прохода

Толщина такого слоя пренебрежимо мала по сравнению с толщиной раската. Поэтому указанные факторы не оказывают существенного влияния на среднемассовую температуру и энергосиловые параметры процесса прокатки, и при задании граничных условий ими можно пренебречь. На этом основании при черновой прокатке в качестве граничных условий задавали определенные значения отрицательных теплоточков с поверхностями раската, обеспечивающие плавное падение поверхностной температуры, значения которой совпадают с поверхностными температурами начала первого

и последнего проходов, измеренных пирометрами (рис. 3, а). На этапе чистовой прокатки гидросбив не используется, поверхностные температуры ведут себя стабильно (рис. 3, б). Поэтому граничные условия задавали таким образом, чтобы обеспечить совпадение значений расчетной поверхностной температуры с измеренными значениями поверхностных температур в каждом чистовом проходе. Результаты расчетов — это поля распределений температур (рис. 4), напряжений, деформаций и других параметров процесса по всему объему раската. Отметим большой температурный градиент по сечению

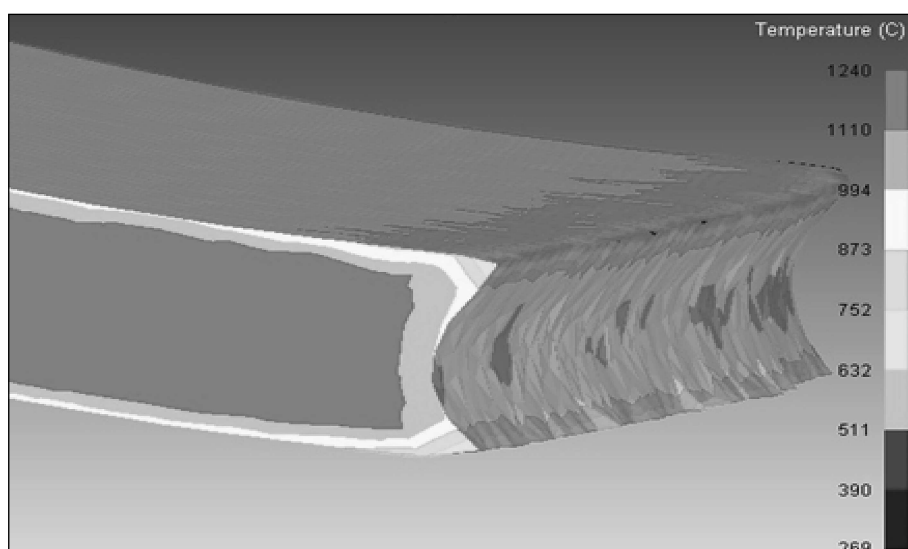


Рис. 4. Температурное поле в среднем сечении раската после четырех черновых проходов



раската, достигающий 300–350 °С, и существенное отличие среднемассовой температуры раската (1170 °С) от поверхностной (950 °С) на этапе черновой прокатки (см. рис. 4).

Среднемассовую температуру раската (без учета заоложенных кромок) в каждом случае определяли с помощью стандартной подпрограммы пакета Deform. В результате были получены зависимости падения среднемассовой температуры по проходам для каждого моделируемого режима (представлены на рис. 5).

Отдельно моделировали охлаждение раскатов при подстуживании от температур окончания черновой прокатки до температуры начала чистовой, которая в значительной степени определяет температуру конца прокатки и конечные механические свойства листа. На стане 5000 существует большое количество различных режимов подстуживания (они отражены в табл. 1), зависящих от промежуточной толщины подката.

Моделировали подстуживание тех раскатов, для которых уже были предварительно рассчитаны черновые пропуски. В качестве начальных условий для моделирования приняли неравномерность температур по объему раската, приобретенную на этапе черновой прокатки (рис. 6, а). Поскольку при подстуживании раската гидросбив не используется, заданием граничных условий в виде отрицательных теплотоков с поверхностей раската можно обеспечить соответствие расчетных и экспериментальных

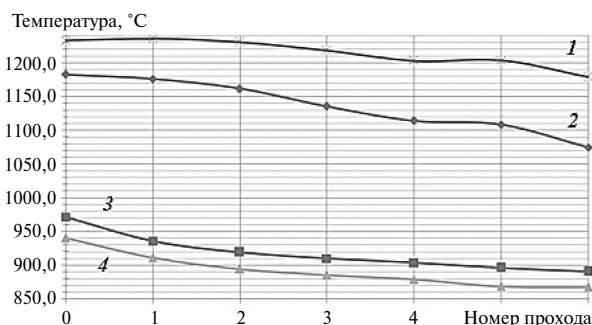


Рис. 5. Рассчитанные при помощи пакета Deform-3D кривые падения среднемассовой и поверхностных температур при черновой прокатке слэба начальной толщиной 250 мм:

1 — температура центральных слоев раската;
2 — среднемассовая температура; 3, 4 — температуры верхней и нижней поверхностей раската

значений поверхностной температуры в момент начала и окончания подстуживания.

На рис. 6 показано изменение температурного поля раската толщиной 115,6 мм, отправленного на подстуживание после шести черновых проходов. Сравнивали измеренную пирометром в начале подстуживания поверхностную температуру раската $T_{\text{пов.эксп}} = 914$ °С с расчетной поверхностной температурой $T_{\text{пов.расч}} = 919$ °С, полученной в Deform после моделирования черновых пропусков. Аналогичное сравнение проводили между измеренной пирометром по окончании подстуживания поверхностной

Таблица 1

Режимы подстуживания, используемые при прокатке на стане 5000

Время подстуживания t , с	Поверхностная температура начала подстуживания T_n (верх), °С	Поверхностная температура конца подстуживания T_k (верх), °С	Толщина раската, отправленного на подстуживание h , мм
169	794	747	79,6
165	785	739	89,4
385	850	725	79,7
592	952	724	78,9
224	862	782	79,7
250	891	803	76
250	885	773	70,7
642	939	766	111,2
1044	969	730	115,4

температурой раската ($T_{\text{пов.эксп}} = 751^\circ\text{C}$), с расчетной поверхностной температурой раската ($T_{\text{пов.расч}} = 759^\circ\text{C}$), полученной в Deform после моделирования подстуживания, продолжительность которого составила 880 с. По рис. 6 видно, что расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются. Расчеты в Deform показывают, что раскаты, толщина подстуживания которых составляла более 100 мм, по окончании подстуживания имеют неравномерность температуры по толщине раската (см. рис. 6, б), в то время как для раскатов с толщинами подстуживания менее 100 мм температуру по толщине раската можно считать приблизительно равномерной. Этот факт необходимо учитывать при назначении обжатов в чистовой группе пропусков.

Температурные поля раскатов после подстуживания были приняты в качестве начальных условий для моделирования чистовой группы пропусков, расчет которой был выполнен по аналогии с расчетом черновых пропусков. Расчеты, выполненные в Deform-3D, показывают, что к концу чистовой прокатки температурный градиент по толщине раската практически отсутствует (рис. 7).

Проверка адекватности выполненных расчетов. Поскольку при моделировании черновой прокатки граничные условия для решения температурной задачи принимались приближенно, адекватность расчета температурного поля рас-

ката на этом этапе оценивали косвенным путем — на основании сопоставления расчетной силы прокатки с силой, измеренной при помощи тензодатчиков, установленных на стане. При этом полагали, что сопротивление деформации исследуемой стали, полученное в испытаниях образцов на сжатие при помощи комплекса Gleeble-3800, определено с максимальной точностью.

Достоинством пакета Deform-3D является возможность учета неравномерности температуры, степеней и скоростей деформаций по объему очага деформации, а также сложного характера напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации, характер которого представлен на рис. 8. Поскольку в модель прокатки пакета Deform были заложены экспериментальные зависимости сопротивления деформации от температуры, степени и скорости деформации, исходной структуры и ее изменения по ходу прокатки [7, 8], то совпадение расчетного и экспериментального значения силы прокатки в проходе должно свидетельствовать об адекватности использованных граничных условий и рассчитанной среднemasсовой температуры. По аналогии с [6] с помощью стандартной подпрограммы пакета Deform-3D получали графики изменения силы прокатки по длине раската для каждого прохода. Учитывали только усилие установившегося процесса прокатки.

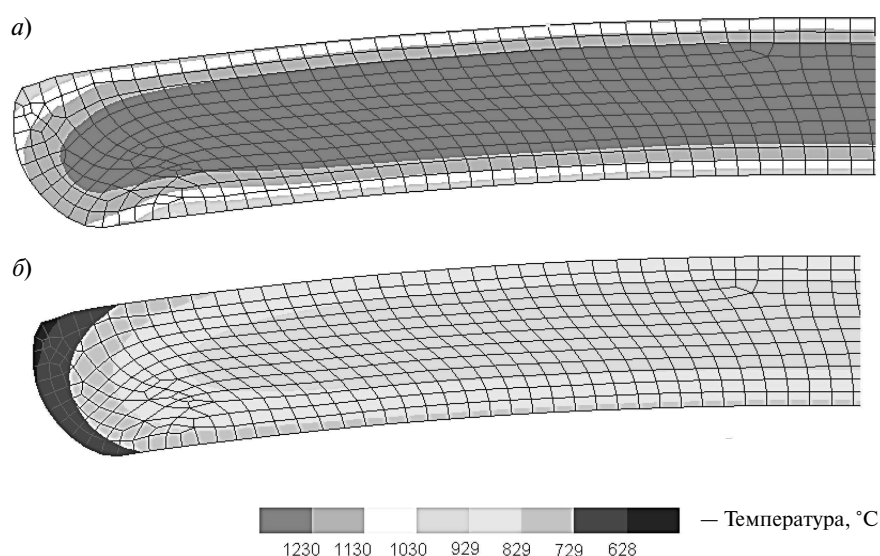


Рис. 6. Температурное поле в среднем сечении раската толщиной 115,6 мм:
а — перед началом подстуживания, б — в конце подстуживания

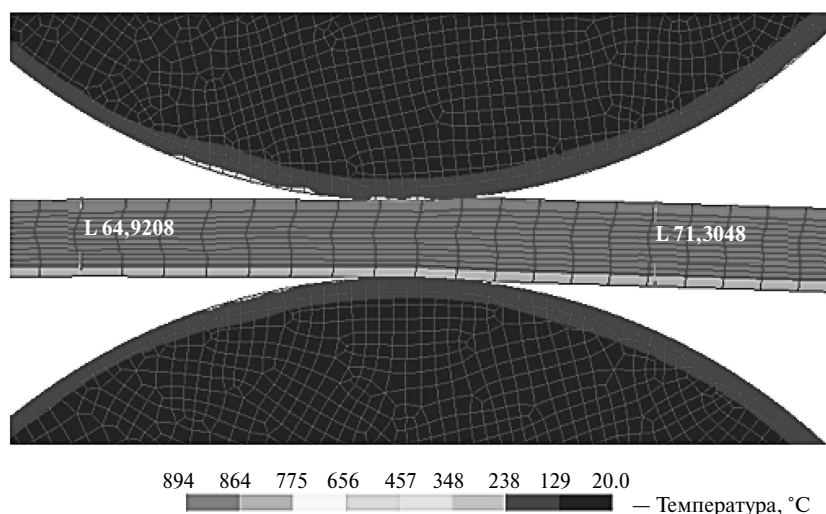


Рис. 7. Температурное поле в среднем сечении раската на этапе чистовой прокатки

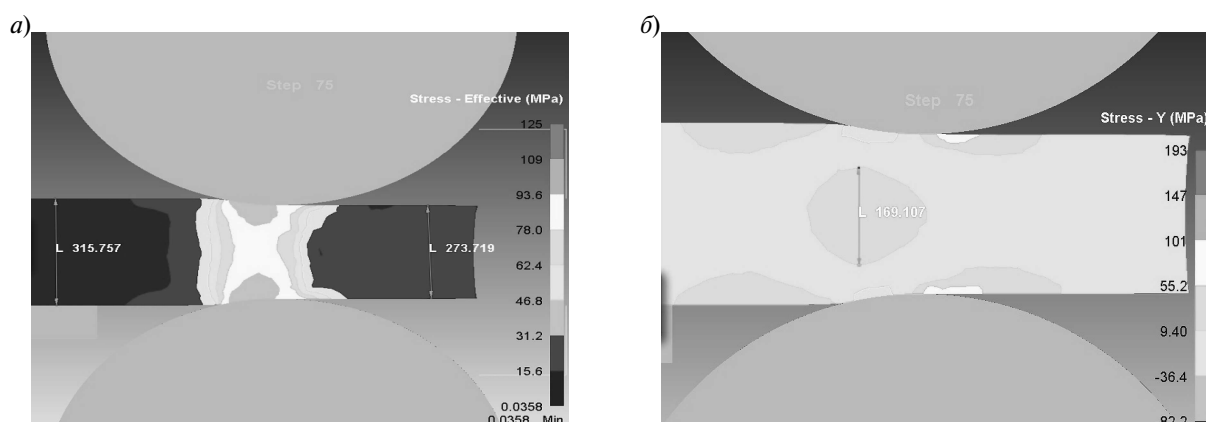


Рис. 8. Интенсивность напряжений (а) и продольные напряжения (б) в раскате в первом проходе с обжатием $\Delta h = 40$ мм при начальной толщине слэба 313 мм

Сравнение расчетных сил прокатки $P_{\text{расч}}$ с измеренными $P_{\text{эксп}}$ представлено в табл. 2. Средняя ошибка расчетов составляет 4 %, максимальная ошибка — 8,4 %, что позволяет судить об адекватности использованной методики расчета и полученных результатов решения термодеформационной задачи в Deform-3D.

Адекватность расчетов температурного поля раската на этапах подстуживания и чистовой прокатки обеспечивали совпадением расчетных и фактически измеренных пирометром поверхностных температур.

Построение упрощенной модели потерь среднемассовой температуры. Для возможности

встраивания полученных результатов в систему автоматического управления станом 5000 создавали упрощенные методики определения среднемассовой температуры раската, способные обеспечить требуемое быстродействие системы автоматического управления станом. Для построения упрощенных моделей выбирали технологические факторы, способные учесть изменение температуры металла при прокатке из-за потерь тепла излучением и конвекцией, отдачи тепла рабочим валкам, повышения теплосодержания за счет энергии пластической деформации, работы сил трения в зоне контакта «полоса — валок». Регрессионным анализом получали соотношения, дающие наименьшее

Таблица 2

Сравнение расчетных и фактических усилий прокатки для сляба с начальной толщиной 313 мм прокатанному по режиму с малыми относительными обжатиями

Номер прохода	Начальная толщина h_0 , мм	Конечная толщина h_1 , мм	Время прохода $t_{\text{прох}}$, сек.	Время паузы на реверс $t_{\text{пауз}}$, сек.	Расчетная среднемассовая температура в проходе $T_{\text{ср расч}}$, °C	$P_{\text{расч}}$, кН	$P_{\text{экспер}}$, кН	Δ , %
1	310	279,3	1,8	5,4	1182	26600	28776	7,6
2	279,3	251,9	2,3	5,5	1180	30890	31865	3,1
3	251,9	225,2	2,5	3,7	1178	31080	31108	0,1
4	225,2	199	2,7	9,2	1175	33700	31733	6,2
5	199	179,4	2,2	5,4	1171	32500	32093	1,3
6	179,4	161,9	2,7	16,5	1164	31000	30699	1,0
7	161,9	138,4	2,7	2,7	1150	41050	38194	7,5
8	138,4	117,1	2,8	6,1	1149	39780	38554	3,2
9	117,1	96,3	3,6	6,1	1142	38500	37893	1,6
10	96,3	79,9	4	4,9	1139	34700	37899	8,4

отклонение рассчитанных по ним значений среднемассовой температуры от значений, вычисленных в Deform-3D. С учетом рекомендаций [4] искали следующие зависимости падения среднемассовой температуры ΔT :

изменение среднемассовой температуры за проход

$$\Delta T_{\text{прох}} = f(T_0, h_0, \Delta h, t), \quad (1)$$

где T_0 — начальная среднемассовая температура раската перед проходом (по результатам расчета температуры конца подстуживания); h_0 — начальная толщина раската перед проходом; Δh — обжатие за проход; t — время прохода;

изменение среднемассовой температуры за время паузы

$$\Delta T_{\text{паузы}} = f(T_0, h, t), \quad (2)$$

где T_0 — начальная среднемассовая температура раската перед паузой; h_0 — толщина раската во время паузы; t — время паузы;

изменение среднемассовой температуры за время подстуживания

$$\Delta T_{\text{подст}} = f(T_0, h, t), \quad (3)$$

где T_0 — начальная среднемассовая температура раската перед подстуживанием; h_0 — толщина раската, находящегося на подстуживании; t — время подстуживания.

Методами множественного регрессионного анализа получены такие соотношения:

падение среднемассовой температуры за черновой проход

$$\lg(\Delta T) =$$

$$= 13,2 - 44,14 \lg(T_0) + 11,04 (\lg(T_0))^2 + \\ + 6,84 \lg(h_0) - 6,44 (\lg(h_0))^2 - 12,7 \lg(\Delta h) + \\ + 4,73 (\lg(\Delta h))^2 - 2,2 \lg(t_{\text{прох}}) - 7,25 (\lg(t_{\text{прох}}))^2; \quad (4)$$

падение среднемассовой температуры за чистовой проход

$$\lg(\Delta T) = -19,05 \lg(T_0) + 6,47 (\lg(T_0))^2 + \\ + 0,065 h_0 - 0,25 \Delta h + 0,074 t_{\text{прох}} + 0,011 t_{\text{прох}}; \quad (5)$$

падение среднемассовой температуры за время паузы на реверс

$$\Delta T_{\text{паузы}} = -232,41 + 280,26 \lg(T_0) - \\ - 48,32 (\lg(T_0))^2 - 148,9 \lg(h) + 31,4 (\lg(h))^2 + \\ + 0,72 t - 0,0013 t^2; \quad (6)$$

падение среднемассовой температуры при подстуживании

для раскатов толщиной менее 100 мм

$$\Delta T_{\text{подст}} = -0,33 t + 0,322 h + 0,14 T_0; \quad (7)$$

для раскатов толщиной 100–140 мм

$$\Delta T_{\text{подст}} = -0,33 t + 0,522 h + 0,1 T_0; \quad (8)$$

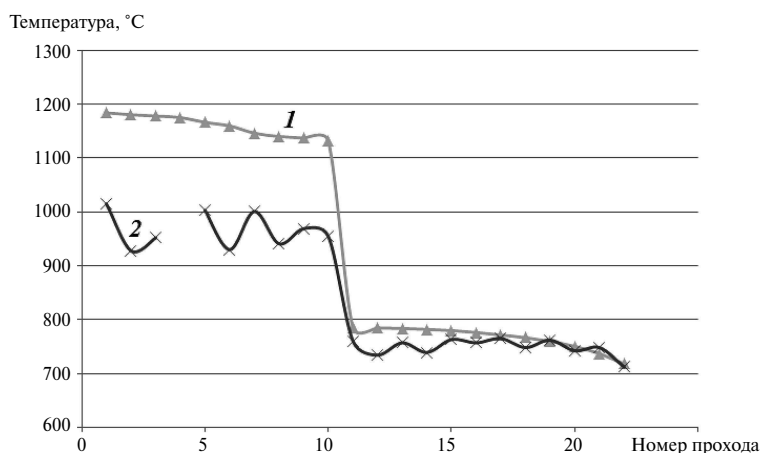


Рис. 9. Рассчитанные среднемассовые температуры раската (1) в сравнении с поверхностными температурами раската (2), измеренными пирометрами для одной из прокатанных полос из литого сляба толщиной 313 мм

для раскатов толщиной более 140 мм

$$\Delta T_{\text{подст}} = -0,2t + 0,61h + 0,09T_0. \quad (9)$$

Реализация полученных зависимостей в программном виде позволила обеспечить быстрое действие расчетов среднемассовых температур раската, которое для всего цикла прокатки толстого листа начиная от выдачи металла из печи и кончая последним обжатием составляет менее 1 с. Характерный вид зависимости среднемассовой температуры по про-

пускам в сравнении с поверхностной температурой представлен на рис. 9.

Таким образом, результатом работы стало создание быстродействующей методики расчета среднемассовой температуры в каждом проходе для раската из трубной стали категории прочности К60. Полученная методика характеризуется высоким быстродействием и будет использована для расчета энергосиловых параметров прокатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полухин, П.И. Прокатка толстых листов [Текст] / П.И. Полухин, В.М. Клименко, В.П. Полухин, В.П. Погоржельский [и др.].— М.: Металлургия, 1984.— 288 с.
2. Парамошин, А.П. Производство листа: [Текст] / А.П. Парамошин, Н.В. Гончаров, А.Л. Паршин [и др.] / Науч. тр. МЧМ СССР // Металлургия.— 1976.— №4.— С. 63–68.
3. Ефимов, В.А. Форма слябинговых и крупных листовых слитков [Текст] / В.А. Ефимов, И. Д. Кузема.— М.: Металлургия, 1967.— 168 с.
4. Коновалов, В.Ю. Расчет параметров листовой прокатки [Текст] / В.Ю. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.И. Пономарев.— М.: Металлургия, 1986.— 429 с.
5. Мишин, В.В. Разработка технологии горячей и теплой пластической деформации нанокристаллического бериллия, полученного гидридным методом [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук / В.В. Мишин.— СПб., 2011.
6. Лунев, В.А. Тепловые потери при прокатке толстого листа на стане 5000. Часть 1: Теплотери на операциях, предшествующих прокатке [Текст] / В.А. Лунев, И. А. Шишов, П.А. Глухов, А.А. Беляев // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2013.— №1(166).— С. 146–153.
7. Васильев, А.А. Моделирование микроструктуры и механических свойств стального листа после прокатки на стане 2000 ОАО «Северсталь» [Текст] / А.А. Васильев, Н.Г. Колбасников, Д.Ф. Соколов, С.Ф. Соколов // Вопросы материаловедения.— 2010. №3(63).— С. 16–26.
8. Соколов, С.Ф. Исследование и моделирование эволюции микроструктуры и сопротивления деформации сталей при горячей обработке давлением [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук / С.Ф. Соколов.— СПб., 2013.

REFERENCES

1. **Polukhin, P.I.** Prokatka tolstykh listov [Tekst] / Polukhin P.I. [et all.].— М.: Metallurgiya, 1984, 288 s.(rus.)
2. **Paramoshin, A.P.** Proizvodstvo lista [Tekst] / A.P. Paramoshin, N.V. Goncharov, A.L. Parshin [et all.] // Nauch. tr./MChM SSSR. №4.— S. 63–68.(rus.)
3. **Efimov, V.A.** Forma sliabingovykh i krupnykh listovykh slitkov [Tekst] / V.A. Efimov, I.D. Kuzema.— М.: Metallurgiya, 1967.— 168 s. (rus.)
4. **Konovalov, V.Iu.** Raschet parametrov listovoi prokatki [Tekst] / V.Iu. Konovalov, A.L. Ostapenko, V.I. Ponomarev.— М.: Metallurgiya, 1986. (rus.)
5. **Mishin, V.V.** Razrabotka tekhnologii goriachei i teploi plasticheskoi deformatsii nanokristallicheskogo berillia, poluchennogo gidridnym metodom: diss. ...kand. tekhn. nauk [Tekst] / V.V. Mishin.— SPb., 2011. (rus.)
6. **Lunev V.A., Shishov I.A., Glukhov P.A., Beliaev A.A.** Teplovye poteri pri prokatke tolstogo lista na stane 5000. Chast' 1: Teplopoteri na operatsiiakh, predshestvuiushchikh prokatke [Tekst] // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2013.— №1(166).— S. 146–153. (rus.)
7. **Vasil'ev A.A., Kolbasnikov N.G., Sokolov D.F., Sokolov S.F.** Modelirovanie mikrostruktury i mekhanicheskikh svoystv stal'nogo lista posle prokatki na stane 2000 OAO «Severstal'» [Tekst] // Voprosy materialovedeniia.— 2010.— №3(63).— S. 16–26. (rus.)
8. **Sokolov, S.F.** Issledovanie i modelirovanie evoliutsii mikrostruktury i soprotivleniia deformatsii staley pri goriachei obrabotke davleniem [Tekst]: Dis. ... kand. tekhn. nauk /S.F. Sokolov.— SPb.— 2013. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

КОЛБАСНИКОВ Николай Георгиевич — доктор технических наук профессор кафедры технологии и исследования материалов Института металлургии, машиностроения и транспорта, заведующий лабораторией исследования и моделирования структуры и свойств металлических материалов Объединенного научно-технического института Санкт-Петербургского государственного политехнического института; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: nikolay.kolbasnikov@gmail.com

KOLBASNIKOV Nikolai G. — St.-Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: nikolay.kolbasnikov@gmail.com

ШИШОВ Иван Александрович — аспирант кафедры технологии и исследования материалов», инженер НИЛ пластической обработки металлов Института металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: shishov_i@list.ru

SHISHOV Ivan A. — St.-Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; phone: e-mail: shishov_i@list.ru

ГЛУХОВ Павел Александрович — аспирант кафедры технологии и исследования материалов, инженер НИЛ пластической обработки металлов Института металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: plast-ftim@mail.ru

GLUKHOV Pavel A. — St.-Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: plast-ftim@mail.ru

БЕЛЯЕВ Александр Анатольевич — специалист по технологии и оборудованию ЛПЦ-3 ОАО «Северсталь»; 196651, пр. Ленина, д.1, Колпино, Санкт-Петербург, Россия; тел. (812) 334–74–17, e-mail: belyaev@severstal.com

BELYAEV Alexander A. — JSC «Severstal»; 196651, pr. Lenina, 1, Kolpino, St.-Petersburg, Russia; e-mail: belyaev@severstal.com