

УДК 621.771.2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ В РАЗГОННЫХ КАЛИБРАХ

М. Г. Коренко

Ассистент

Кафедра Литейно-прокатных технологий
Криворожский металлургический факультет
Национальная металлургическая академия Украины
ул. Революционная, 5, г. Кривой Рог,
Днепропетровская область, Украина, 50086
Контактный тел.: (0564) 71-50-32,
067-587-32-45, 050-172-12-14
E-mail: marinak2010@bk.ru

З використанням двох- і тривимірних кінцево-елементних підходів уточнені математичні моделі напружено-деформованого стану металу при гарячій прокатці штрипових і стрічкових заготовок при реалізації процесів гарячого плющення і прокатки в розгінних калібрах.

Ключові слова: гаряча прокатка, штрипові і сортові заготовки.

С использованием двух- и трехмерных конечно-элементных подходов уточнены математические модели напряженно-деформированного состояния металла при горячей прокатке штриповых и ленточных заготовок при реализации процессов горячего плющения и прокатки в разгонных калибрах.

Ключевые слова: горячая прокатка, штриповые и сортовые заготовки.

By using two-and three-dimensional finite-element approaches refined mathematical models of the stress-strain state of metal during hot rolling shtripsovyh and tape blanks in the implementation process of hot rolling and flat-tening under overlocking calibers.

Keywords: hot rolling, and varietal shtripsovyie workpiece.

Введение

Многообразие технологических схем процесса горячей прокатки, реализуемых при производстве штриповых и сортовых заготовок, свидетельствует о целесообразности использования не только одномерных по кинематике методов расчета, а и более строгих двух- и трехмерных методов анализа напряженно-деформированного состояния металла.

При прокатке в черновой группе рабочих клетей мелкосортного прокатного стана соотношение общей протяженности очага деформации и средней толщины находится в диапазоне $L/h_{cp} = 0,5 \dots 2,5$, характеризующемся повышенным влиянием внешних зон [1, 2–7, 8, 9, 10]. Кроме того, в чистовых группах рабочих клетей того же стана наряду с горизонтальными используются и вертикальные рабочие клетки, расчет напряженно-деформированного состояния в которых является весьма специфичным. Отмеченное в полной мере касается и реализуемых на ряде станков, процессов горячей бескалндровой прокатки, процессов горячего плющения и процессов горячей прокатки сортовых заготовок в рабочих валках с разгонными калибрами в том числе и разработанного процесса плющения исходных круглых заготовок с использованием разгонных калибров (рис. 1) [11, 12, 13, 14].

Исходя из изложенного выше, при анализе напряженного состояния металла в диапазоне геометрического параметра очага деформации $L/h_{cp} = 0,5 \dots 2,5$ использовали программный комплекс ABAQUS [15], а полученные в этом случае результаты в виде расчетных распределений коэффициента напряженного состояния n_{σ} представлены на рис. 2,а. На этом же рисунке иллюстри-

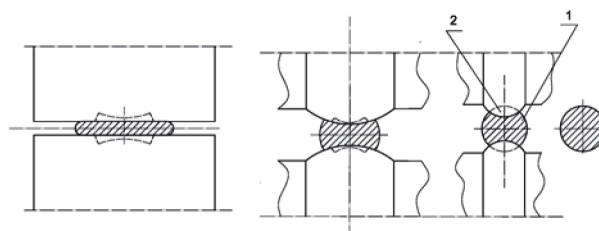


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема условий реализации процесса производства горячекатаных лент на основе плющения исходных круглых заготовок 1 с использованием разгонных калибров 2 [13, 14]

рованы и аналогичные распределения, полученные на основе методик А. И. Целикова-Смирнова [2], В. Ф. Потапкина [10] и М. Я. Бровмана [9]. Кроме того, на рис. 2,б представлены расчетные распределения коэффициента плеча ψ , знание которого необходимо для определения момента прокатки [2, 10].

Анализ полученных расчетных распределений свидетельствует о достаточной степени количественного и качественного соответствия метода конечных элементов другим широко используемым методам расчета и, как следствие, о возможности дальнейшей реализации конечно-элементных подходов применительно к решению целого ряда задач, связанных с расчетами напряженно-деформированного состояния металла при горячей прокатке штриповых и сортовых заготовок. В частности, на рис. 3 представлены расчетные распределения коэффициента напряженного состояния n_{σ} в зависимости не только от соотношения L/h_{cp} , а и коэффициента внешнего контактного трения μ . Анализируя данные

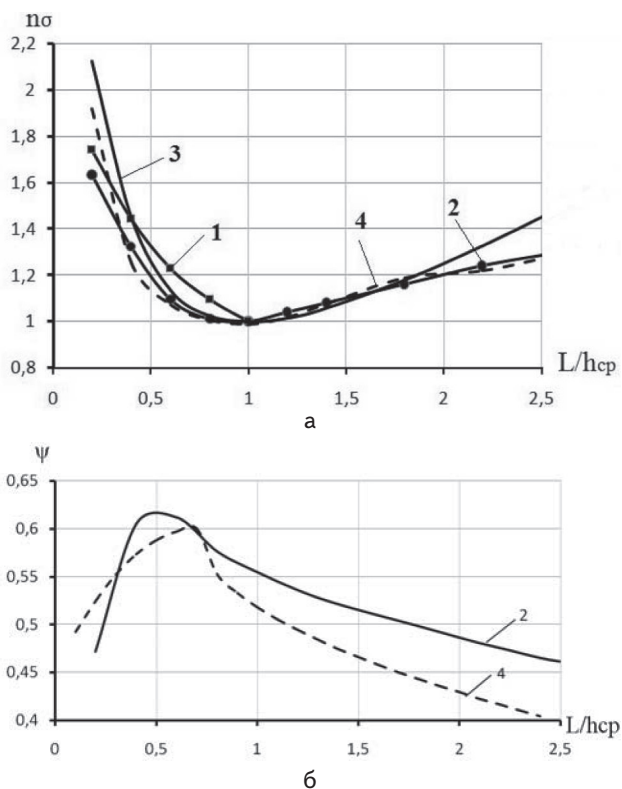


Рис. 2. Расчетные распределения коэффициента напряженного состояния n_σ (а) и коэффициента плеча ψ (б) в зависимости от соотношения L/h_{cp} , полученные в соответствии с методиками: 1 — Целиков-Смирнов [2], 2 — В. Ф. Потапкина [2], 3 — М. Я. Бровмана [9], 4 — на основе результатов численной реализации метода конечных элементов (прикладной пакет ABAQUS)

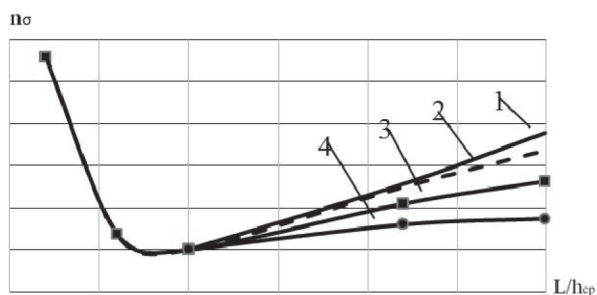


Рис. 3. Расчетные распределения коэффициента напряженного состояния n_σ в зависимости от соотношения L/h_{cp} , полученные на основе результатов численной реализации метода конечных элементов (прикладной пакет ABAQUS) при различных значениях коэффициента внешнего трения μ : 1 — $\mu = 0,45$; 2 — $\mu = 0,35$; 3 — $\mu = 0,25$; 4 — $\mu = 0,15$

результаты, следует отметить, что в диапазоне $L/h_{cp} < 1$, влияние внешнего контактного трения является крайне незначительным, в то время как в случае $L/h_{cp} = 1 \dots 2,5$ данное влияние имеет место и при $L/h_{cp} = 2,5$ интенсивность снижения коэффициента напряженного состояния n_σ , а, следовательно, и вносимая погрешность могут достигать 11...20 (%). С целью повышения точности результатов расчета энергосиловых параметров в этом случае, то есть в диапазоне $L/h_{cp} = 1 \dots 2,5$, целесообразным является использование зависимости

$$n_\sigma = 1 + 0,65\mu(L/h_{cp} - 1). \tag{1}$$

Решение других более сложных задач, таких как расчет напряженно-деформированного состояния металла при горячем плющении, прокатке в вертикальных рабочих валках и прокатке в разгонных калибрах, требующий не двухмерного, а трехмерного подхода, осуществлено с использованием конечно-элементной программы QForm [16, 17], обеспечивающей моделирование всех стадий технологии процесса прокатки, начиная с анализа условий захвата заготовки рабочими валками, пластическую деформацию заготовки по переходам и кантовку между ними.

Данный программный продукт позволяет генерировать конечно-элементную сетку в полностью автоматическом режиме без какого-либо вмешательства со стороны пользователя. Плотность сетки зависит от формы валков и заготовки, от хода моделирования и других параметров, в результате сетка, сгенерированная программой, имеет более высокое качество, чем если бы она создавалась опытными специалистами в области метода конечных элементов. Адаптивный самоконтролируемый алгоритм обеспечивает оптимальную плотность сетки, то есть меньшие элементы автоматически создаются в критических областях для анализа особых эффектов, таких как дефекты течения материала и другие. Результаты моделирования показываются с помощью 3D графики в процессе моделирования, что позволяет получать постоянный отклик со стороны программы [16].

Основными отличительными особенностями использования конечно-элементного ядра QForm 3D являются:

- объемная конечно-элементная сетка — линейные тетраэдры, поверхностная пространственная сетка — квадратичные треугольники;
- построение конечно-элементной сетки, как на поверхности, так и в объеме, полностью автоматическое без вмешательства пользователя. Перестроение и адаптация сетки производится также автоматически, исходя из требуемой точности решения задачи;
- пошаговая процедура расчета формоизменения при прокатке является адаптивной с автоматическим выбором шага по времени;
- материал заготовки рассматривается как вязкопластическое тело, а материал инструментов — упругодеформируемый либо абсолютно твердый;
- механические свойства металла зависят от степени, скорости и температуры деформации.

Среди возможностей расчетной программы можно отметить то, что пластическое формоизменение заготовки рассматривается с учетом тепловых процессов, при этом теплообмен между заготовкой и инструментами учитывается коэффициентом теплопередачи.

Непосредственно численная модель процессов горячей прокатки основана на элементах теории течения металла [18]. В частности, материал заготовки рассматривается как несжимаемое жесткопластическое тело. Упругие деформации не рассматриваются ввиду их незначительной величины по сравнению с пластическим формоизменением заготовки, а система исходных уравнений включает в себя:

- уравнение движения: $\sigma_{ij,j} + \rho(dv_i/dt) = 0$; (2)
- кинематические соотношения: $\dot{\epsilon}_{ij} = (v_{i,j} + v_{j,i})/2$; (3)
- определяющие уравнения: $\sigma_{ij} = 2\bar{\sigma}\dot{\epsilon}_{ij}/(3\dot{\epsilon})$; (4)
- условие несжимаемости: $v_{i,i} = 0$; (5)
- уравнение теплопроводности: $\rho cT = (k_{i,i})_i + \beta\bar{\sigma}\dot{\epsilon}$; (6)

■ уравнение сопротивления деформации для жестко-пластического материала: $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, t)$, (7) где $\sigma_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}, v_i$ — тензоры напряжений, скоростей деформации и вектор скорости, соответственно; $\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}$ — интенсивность напряжений, степеней и скоростей деформаций, соответственно; t, c, k_1 — температура деформируемой заготовки, а также теплоемкость и теплопроводность ее материала; β — коэффициент перехода энергии деформации в тепло, принимаемый равным 0,90 ... 0,95.

В плоскости сопряжения деформируемой заготовки и инструмента количественная оценка касательных контактных напряжений производится в соответствии с законом Леванова [19]

$$F_t = m\bar{\sigma}(1 - e^{-1,25(\sigma_n/\bar{\sigma})})/\sqrt{3}, \quad (8)$$

где m, σ_n — фактор трения и величина нормальных контактных напряжений.

Уравнение (8) можно рассматривать как комбинацию законов Зибеля и Амонта-Кулона, учитывающую преимущество закона постоянного трения и влияние низких контактных напряжений, при этом значение фактора трения m для различных пар контактных инструментальных и деформируемых материалов достаточно широко представлено в научно-технической литературе, в том числе и в работе [19].

Дискретизация уравнений (2)–(5) производили на основе принципа виртуальных скоростей и работ, а также метода конечных элементов. Неизвестными являются узловые значения скоростей и средних напряжений. Конечно-элементная сетка состоит из линейных четырехузловых тетраэдров и квадратичных треугольников с шестью узлами [16, 20, 21].

Инструмент рассматривается как абсолютно жесткое тело при расчете пластического формоизменения заготовки. Заготовка и инструменты импортируются из CAD систем при помощи STEP или IGES форматов.

В качестве примера результатов численной реализации рассмотренного программного обеспечения [20, 21], на рис. 4 представлены исходные и результирующие геометрические характеристики, а также расчетные распределения деформаций и напряжений, полученные применительно к условиям реализации процесса горячего плющения исходной заготовки диаметром 10 мм из стали 10. Конечная толщина в этом случае соответствовала $h_1 \approx 7$ мм, а радиус рабочих валков принят равным $R = 150$ мм. Аналогичные результаты были получены применительно к конечным толщинам 9 мм и 8 мм, а их количественные оценки сведены в табл. 1.

Анализ полученных результатов показал, что с повышением уровня относительного обжатия $(d_0 - h_1)/d_0$ наряду с увеличением компонент напряженного и деформированного состояния металла, а также конечной ширины B_1 , имеет место и увеличение показателя вытяжки в осевом направлении λ , определяемого как соотношение площадей исходных F_0 и результирующих F_1 поперечных сечений обрабатываемой заготовки. Отмеченное свидетельствует о наличии пластического течения металла не только в поперечном, а и в продольном направлениях. С увеличением относительного обжатия интенсивность продольного пластического течения металла возрастает (см. табл. 3.1), что должно быть учтено при расчете результирующих геометрических характеристик, а также при расчете энергосиловых параметров собственно самого процесса горячего плющения.

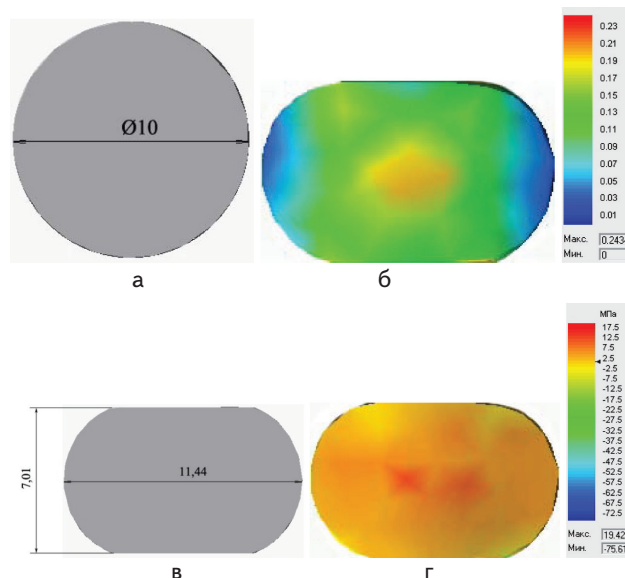


Рис. 4. Исходные (а) и результирующие (б) геометрические характеристики заготовки, а также расчетные распределения деформаций (в) и напряжений (г), полученные на основе метода конечных элементов применительно к условиям реализации процесса горячего плющения штриповых и ленточных заготовок

Таблица 1

Расчетные значения геометрических характеристик поперечного сечения заготовок, полученные на основе метода конечных элементов применительно к условиям реализации процесса горячего плющения

№	$d_0, (mm)$	$h_1, (mm)$	$B_1, (mm)$	$F_0, (mm^2)$	$F_1, (mm^2)$	$\lambda = F_0/F_1$
1	10	9	10,2	78,5	75,9	1,034
2	10	8	10,7	78,5	73,5	1,068
3	10	7	11,4	78,5	71,1	1,104

Аналогичные расчеты проведены и применительно к процессу горячей прокатки с использованием разгонных калибров (см. рис. 1) [20]. При этом в качестве моделируемой технологической схемы рассматривали процесс горячей прокатки исходной плоской заготовки одного и того же поперечного сечения $h_0 \times B_0 = 17,5 \times 45$ (мм), первоначально прокатываемой в разгонных калибрах с различным радиусом выпуклости R_{pk} (табл. 2, рис. 5) и с последующей прокаткой лентой одной и той же конечной толщины в цилиндрических рабочих валках (рис. 6, 7).

Анализ представленных результатов свидетельствует о том, что использование технологий процесса горячей прокатки ленточных заготовок в разгонных калибрах позволяет при прочих равных условиях регулировать их конечную ширину B_1 в достаточно широком диапазоне. В частности, если при прокатке по традиционной схеме, то есть в цилиндрических рабочих валках, конечная величина уширения составила 12,1 (мм), то при прокатке с использованием разгонных калибров она может достигнуть 16,3 (мм), то есть увеличиться на 32,5 %. Отмеченное подтверждает эффективность рассмотренной технологической схемы с точки зрения дополнительной

Таблица 2

Геометрические характеристики поперечных сечений заготовок, используемые при конечно-элементном математическом моделировании процесса горячей прокатки в рабочих валках с разгонными калибрами

№ п/п	Обозначения на рис. 3.14	R_{pk} , (мм)	B_o , (мм)	Обозначения на рис. 4	h_1 , (мм)	B_1 , (мм)
1	а	0,0	54,2	а	7,5	57,1
2	б	337	53,7	б	7,5	58,5
3	в	203	53,5	в	7,5	59,7
4	г	102	53,1	г	7,5	61,3

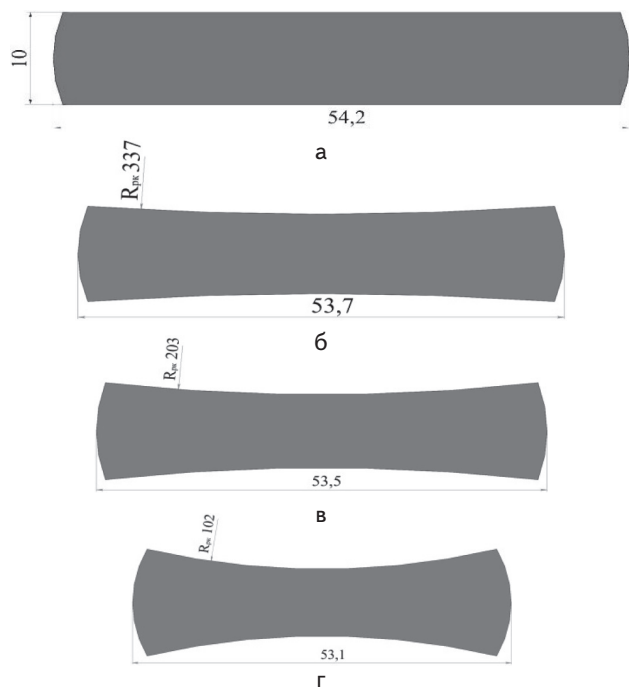


Рис. 5. Расчетные значения геометрических характеристики поперечных сечений горячекатаных заготовок после прокатки в цилиндрических (а) и в рабочих валках с разгонными калибрами различного радиуса выпуклости R_{pk} (б, в, г) (см. табл. 2)

степени свободы по целенаправленному регулированию конечных геометрических характеристик горячекатаных

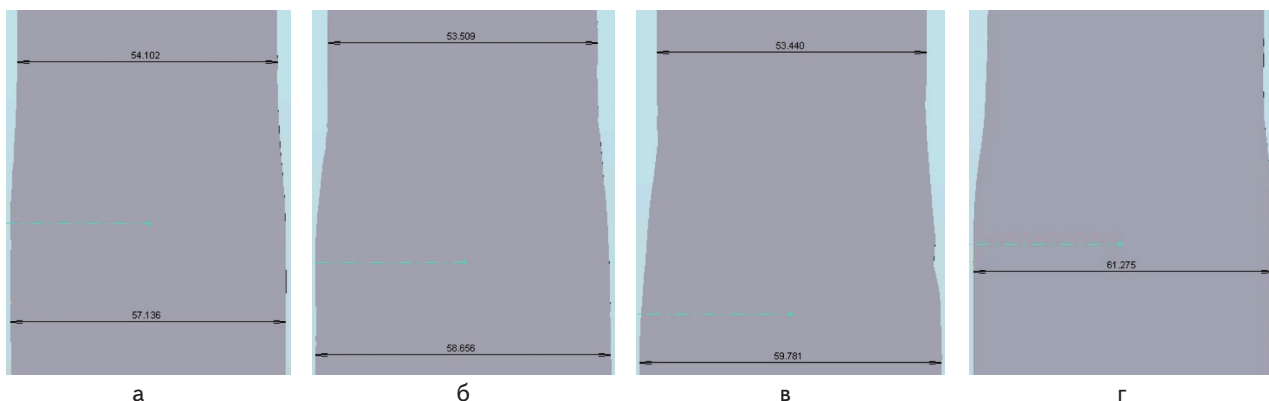


Рис. 6. Расчетные значения геометрических характеристик ленточных заготовок, полученных после горячей прокатки без использования (а) и с использованием в предыдущем проходе разгонных калибров с различными радиусами выпуклости R_{pk} (б, в, г) (см. табл. 2, рис. 5)

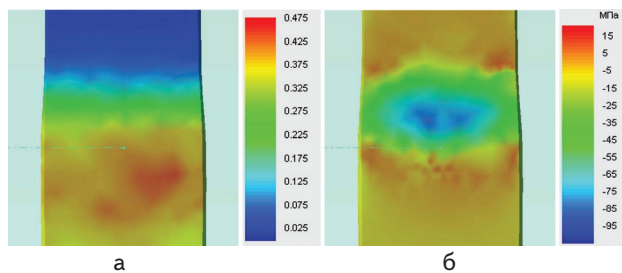


Рис. 7. Расчетные, полученные на основе конечно-элементного подхода, распределения деформаций (а) и средних напряжений (б) при горячей прокатке ленточных заготовок с использованием в предыдущем проходе рабочих валков с разгонными калибрами радиусом $R_{pk} = 102$ мм (см. рис. 5,г; 6,г)

ленточных заготовок, при этом в качестве математического обеспечения данного регулирования могут быть использованы полученные в рамках данной работы программные средства, основанные на реализации конечно-элементного подхода и позволяющие прогнозировать не только результирующие геометрические характеристики, а и реальные распределения основных компонент напряженного и деформированного состояния металла (рис. 5, 7).

Эффективность данного подхода может быть подтверждена и на примере процесса горячей прокатки ленточных заготовок в вертикальных рабочих клетях сортовых прокатных станов (рис. 8). Реализация в данном случае сочетания расчетов процессов прокатки в вертикальных и в горизонтальных рабочих валках позволяет прогнозировать при заданном значении конечной толщины h_1 и расчетную величину конечной ширины B_1 . Отмеченное позволяет использовать данные программные средства не только к расчету, а и применительно к автоматизированному проектированию технологических режимов обжатий, исходя из условия обеспечения заданного типоразмера горячекатаных штрипсовых и ленточных заготовок.

Выводы

На основе полученных зависимостей были созданы математические модели для определения локальных характеристик напряженно-деформированного состояния металла в зоне пластического формоизменения.

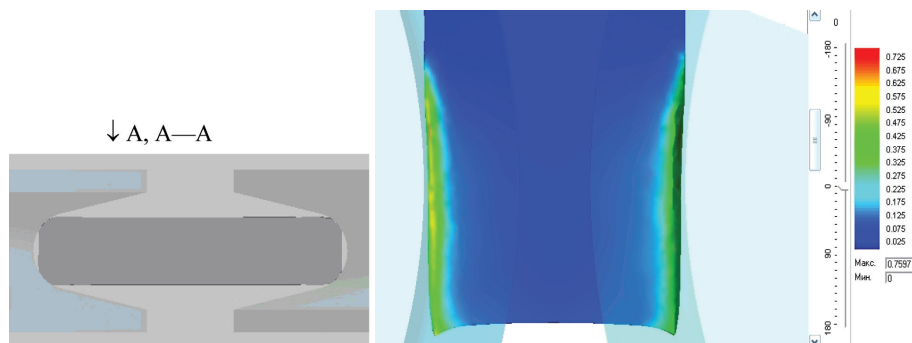


Рис. 8. Результаты конечно-элементного математического моделирования деформированного состояния металла при горячей прокатке ленточных заготовок в вертикальных рабочих валках сортовых станов

С использованием двух- и трехмерных конечно-элементных подходов уточнены математические модели напряженно-деформированного состояния металла при горячей прокатке относительно толстых штрипсовых и ленточных заготовок в черновых и в вертикальных рабочих клетях, а также при реализации процессов горячего плетения и прокатки в разгонных калибрах.

Литература

1. Процесс прокатки [Текст] / М. А. Зайков, В. П. Полухин, А. М. Зайков, Л. Н. Смирнов. — М. : МИСИС, 2004. — 640 с.
2. Целиков А. И. Теория продольной прокатки [Текст] / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. — М. : Metallurgy, 1980. — 320 с.
3. Коновалов Ю. В. Расчет параметров листовой прокатки [Текст] : справочник / Ю. В. Коновалов, А. Д. Остапенко, В. Н. Пономарев. — М. : Metallurgy, 1986. — 430 с.
4. Василев Я. Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки [Текст] / Я. Д. Василев. — М. : Metallurgy, 1995. — 368 с.
5. Капланов В. И. Высокоскоростная холодная прокатка тонких полос [Текст] / В. И. Капланов. — К. : Вища шк., 1993. — 254 с.
6. Грудев А. П. Теория прокатки [Текст] / А. П. Грудев.; изд. 2-е перераб. и доп. — М. : Интермет Инжиниринг, 2001. — 280 с.
7. Василев Я. Д. Теория продольной прокатки [Текст] : підручник / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. — Донецьк : УНІТЕХ, 2009. — 488 с.
8. Федоринов В. А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос [Текст] : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. — Краматорск : ДГМА, 2010. — 243 с.
9. Бровман М. Я. Применение теории пластичности в прокатке [Текст] / М. Я. Бровман. — М. : Metallurgy, 1991. — 265 с.
10. Потапкин В. Ф. Метод полей линий скольжения в теории прокатки широких полос [Текст] : монография / В. Ф. Потапкин. — Краматорск : ДГМА, 2005. — 316 с.
11. Капланов В. И. Производство плющеных лент: состояние, проблемы, перспективы [Текст] / В. И. Капланов, В. П. Чумаков, М. Г. Коренко // Metallургическая и горнорудная промышленность. — 2010. — Вып. 2. — С. 108–110.
12. Капланов В. И. Пути развития производства плющенной ленты [Текст] / В. И. Капланов, В. П. Чумаков, М. Г. Коренко // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. — Краматорск : ДГМА, 2010. — № 1(20). — С. 205–208.
13. Капланов В. И. Энергоэффективный процесс получения плющенных лент в условиях мелкосортных станов [Текст] / В. И. Капланов, Н. В. Староста, М. Г. Коренко // Вестник Национального технического университета «ХПИ». — № 42. — 2010. — С. 28–32.
14. Пат. 53391 UA, МПК В21В 1/02. Спосіб виготовлення стрічки плющенням [Текст] / В. И. Капланов, В. П. Чумаков, Н. В. Староста, М. Г. Коренко. — № 201002663; заявл. 10.03.2010; опубл. 11.10.2010, бюл. № 19. — 2 с.
15. Манилык Т. А. Практическое применение программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах [Текст] / Т. А. Манилык, К. А. Ильин. — М. : МФТИ, Тесис, 2006. — 67 с.
16. Белокуров О. А. Применение программы моделирования процессов ОМД QForm для обучения и исследовательской работы в университетах [Текст] / О. А. Белокуров, Н. В. Биба, Ю. А. Гладков // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: темат. сб. науч. тр. — Краматорск : ДГМА, 2008. — С. 9–14.
17. Zienkiewicz O. C. Flow formulation for numerical solution of metal forming processes. In Numerical analyses of forming processes (Ed. J.F.T. Pittman, O.C.Zienkiewicz, R.D.Wood and J.M.Alexander), 1984. — P. 1–44.
18. N. Biba, S. Stiebunov. 3D Finite Element Simulation of Material Flow / N. Biba, S. Stiebunov. — Metallurgia, v. 69, 2002, No. 2, pp. FT8-FT10.
19. Контактное трение в процессах ОМД [Текст] / А. Н. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин и др. — Москва, 1976.
20. Конечно-элементное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла ленточных заготовок при их горячем плетении и прокатке в разгонных калибрах [Текст] / В. И. Капланов, М. Г. Коренко, А. А. Иванов, А. С. Картавенко // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. — № 4(25). — 2010. — Краматорск. — С. 57–62.
21. Конечно-элементное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла ленточных заготовок при их горячем плетении и прокатке в разгонных калибрах [Текст] / В. И. Капланов, М. Г. Коренко, А. А. Иванов, А. С. Картавенко // Теоретичні і прикладні задачі обробки металів тиском та авто технічних експертиз: збірник тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції, м. Вінниця: ВНТ. — 2011. — С. 160–162.