

И.Ю.Приходько, М.А.Дедик

Институт черной металлургии им.З.И. Некрасова НАН Украины

РАСЧЕТ ЦИКЛИЧЕСКИХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В РАБОЧИХ ВАЛКАХ В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ПОЛОС МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С целью снижения вычислительной нагрузки при моделирования процесса горячей прокатки полос разработаны упрощенные модели расчета при сохранении высокой точности результатов. Для расчетов использован упрощенный численный метод конечных элементов и модель плоского деформированного состояния вала. Отличительной особенностью модели является возможность исследования влияния циклических напряжений в приповерхностном слое вала при каждом его обороте. В результате термического анализа рабочего вала в процессе горячей прокатки установлено, что наибольшие температурные градиенты развиваются в приповерхностной области рабочего вала глубиной до 10 мм. Сжимающие напряжения возникают в зоне нагрева, а растягивающие - в зоне охлаждения. Наиболее опасные растягивающие напряжения возникают на глубине 3-6 мм от поверхности вала в первых 1-3-х его оборотах. Разработанную модель можно использовать при анализе усталостного разрушения рабочих валков, вызванного циклическими тепловыми и механическими нагрузками.

Ключевые слова: горячая прокатка, рабочий валок, термические напряжения, метод конечных элементов.

Введение. Прокатные валки являются одними из наиболее дорогих сменных элементов листопрокатных станов. Стоимость одного рабочего вала из легированной стали составляет более 15 000 евро. Поэтому снижение износа и, соответственно, расхода валков на тонну выпускаемой продукции является актуальной задачей.

Рабочие валки прокатных станов одновременно испытывают воздействие циклических тепловых и механических напряжений. Неоднородное распределение температуры в рабочих валках в процессе прокатки вызывает в них термические напряжения. Это происходит из-за резкого циклического изменения температуры в приповерхностном слое валков – контактный нагрев от полосы, охлаждение на воздухе и водой. Механические напряжения в каждом рабочем валке возникают вследствие действия силы прокатки в контакте вала с полосой и опорным валком. В процессе горячей прокатки полос термические напряжения (ТН), как правило, сопоставимы или даже больше, чем механические напряжения [1, 2, 3]. ТН в рабочем валке вызывают упругие и пластические деформации, которые при достижении критических значений могут вызвать безвозвратное формоизменение тела вала, повреждение поверхности, зарождение микротрещин и даже разрушение вала [1]. Оценка усталостной долговечности и разработка безопасных режимов

эксплуатации валков на основе расчётных данных об их напряженном состоянии (НС), вызванном ТН, является важной и актуальной задачей.

Состояние вопроса. Для определения НС рабочего валка стана горячей прокатки необходимо провести связанной термо-механический анализ с применением теорий упругости и термодинамики. Использование аналитических методов является весьма непрактичным, а иногда и неприемлемым подходом. Численные методы, основанные на методе конечных элементов, имеют значительные преимущества перед аналитическими.

Для расчета НС рабочего валка в процессе горячей прокатки полос в численную модель предлагают включать процесс пластической деформации полосы [4]. Однако вычислительные ресурсы и время расчета при этом возрастают, что затрудняет получение и анализ результатов на значительном отрезке времени. Поэтому такое решение представляется нерациональным [5].

Для сокращения потребления компьютерных ресурсов, необходимых для моделирования процесса горячей прокатки полос, разработаны упрощенные модели [6, 7]. Использование таких моделей приводило к сокращению общего времени расчетов, но одновременно вызывало снижение их точности [8].

С учетом вышеизложенного разработаны меры по снижению вычислительной нагрузки при сохранении высокой точности результатов.

Математическая модель

Как упоминалось, выбор метода конечных элементов (МКЭ) для решения поставленной задачи оказался наиболее эффективным. В предлагаемом исследовании проанализированы возможности и

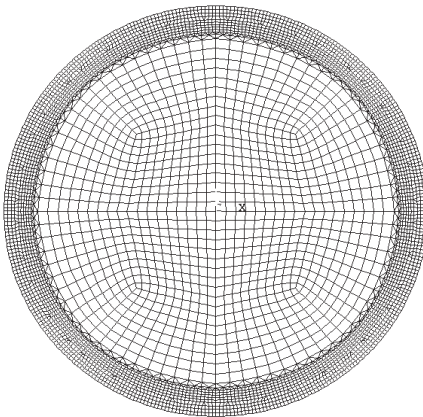


Рис. 1. Двумерная конечноэлементная модель рабочего валка

разработан комплекс обоснованных допущений для прогнозирования ТН на основе МКЭ.

Предложено использование плоской конечноэлементной (КЭ) модели рабочего валка (рис.1) с «вращающимися» вокруг него зонами тепловых воздействий в зонах деформации и охлаждения. Разбивка плоскими КЭ осуществлялась со сгущением сетки в приповерхностном слое.

Использовали тепловые конечные элементы с одной степенью свободы (температура) и механические четырех-узловые с двумя степенями

свободы (перемещения по горизонтали и вертикали).

В качестве примера использовали упругопластическую модель стальных рабочих валков диаметром 800 мм с кинематическим билинейным упрочнением и наличием тепловых эффектов. Исходный предел текучести, коэффициент линейного расширения, плотность, теплопроводность и удельную теплоемкость задавали в виде функций температуры (рис.2). Модуль Юнга принимали равным 210 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,32, коэффициент линейного температурного расширения – $12 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ [9].

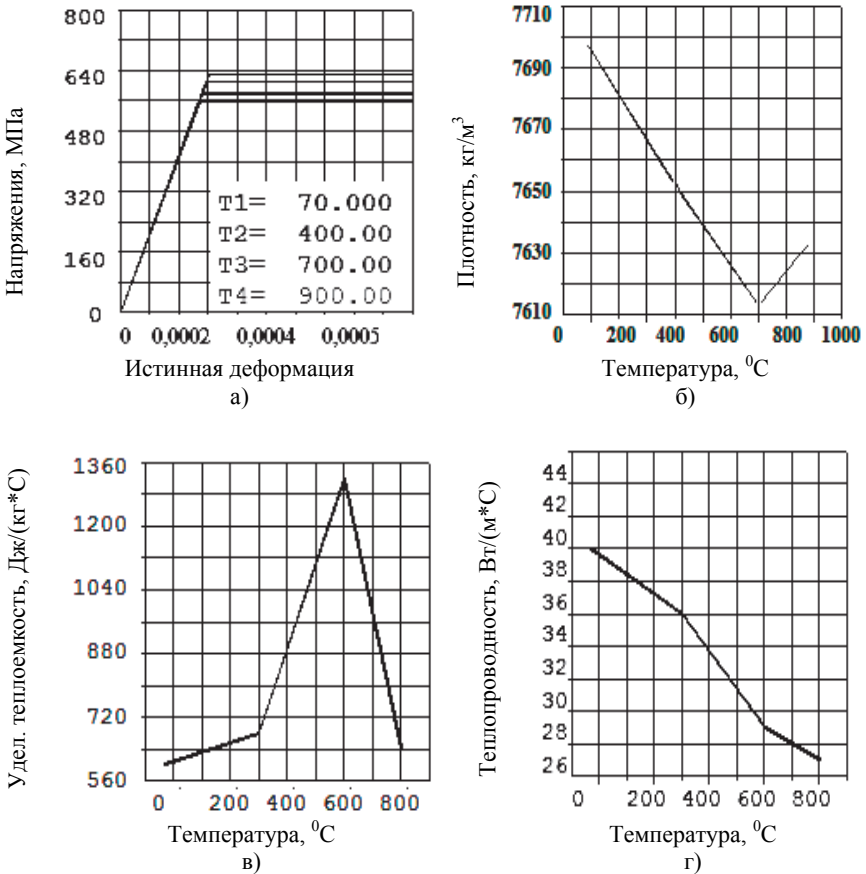


Рис. 2. Основные термомеханические свойства стали рабочего валка в зависимости от температуры [9], где а) – билинейные кривые упрочнения; б) – плотность; в) – удельная теплоемкость; г) – теплопроводность

Тепловой анализ был выполнен с помощью неявного решателя на основе сопряженных градиентов Якоби. Численные результаты теплового анализа применялись как тепловые нагрузки в механическом моделировании посредством так называемого метода "передачи нагрузки". Для выполнения нелинейного решения механической задачи применили алгоритм прямого метода Ньютона-Рафсона с конвергенцией критериев, примененных для перемещений и сил с помощью эффективного решателя явного типа для разреженных матриц. Механическое воздействие полосы задавали в виде контактных напряжений, а нагрузки между рабочим и опорным валками задавали в виде равномерно распределенного нормального давления.

Граничные и начальные условия.

Граничные условия задавали, исходя из схемы на рис.3.

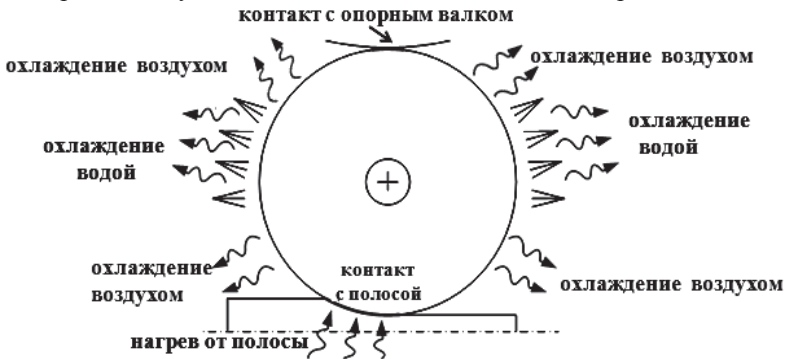


Рис. 3. Схема тепловых граничных условий, действующих на рабочий валок в процессе горячей прокатки

Полагая, что конвективный теплообмен происходит в зонах воздействия от охладителя и воздуха (табл.1), а в очаге деформации (ОД) действует тепловой поток (60 МВт/м^2 , температура 900°C). Начальная температура валка 70°C . Контактные давления принимали равными $P = 130\text{-}170 \text{ МПа}$.

Исследование НДС рабочего валка проводили при угле захвата в диапазоне $\alpha = 10\text{-}14^\circ$ при скорости прокатки $v = 0.3\text{-}2.5 \text{ м/с}$.

Результаты теплового анализа.

В результате решения задачи получены поля температуры и термических напряжений в рабочем валке в процессе горячей прокатки. Сначала моделировали нестационарный термический процесс в рабочем валке, что позволяет выявить тепловой пограничный слой, в котором возникают наибольшие термические градиенты.

Определено температурное поле валка после 6-ти полных оборотов (рис 4). Здесь максимальная температура находится в зоне, примыкающей к очагу деформации, и составляет 535°C . Установлено, что наибольшие

градиенты температуры возникают в приповерхностном слое валка глубиной до 10 мм.

Таблица 1. Исходные данные о параметрах теплообмена в зонах охлаждения

Коэффициенты теплоотдачи, Вт/м ² С по зонам охлаждения						
зона под отсекате лем воды на выходе	зона пассивн. охлажде ния на выходе	зона активно. охлажде ния на выходе	зона возд. охлажде ния сверху	зона пассивн. охлажде ния на входе	зона активн. охлажде ния на входе	зона под отсекате лем воды на входе
50	1000	20 000	1000	10 000	1000	50
Температура охладителей по зонам, °С						
25	33	33	25	33	33	25

°С,

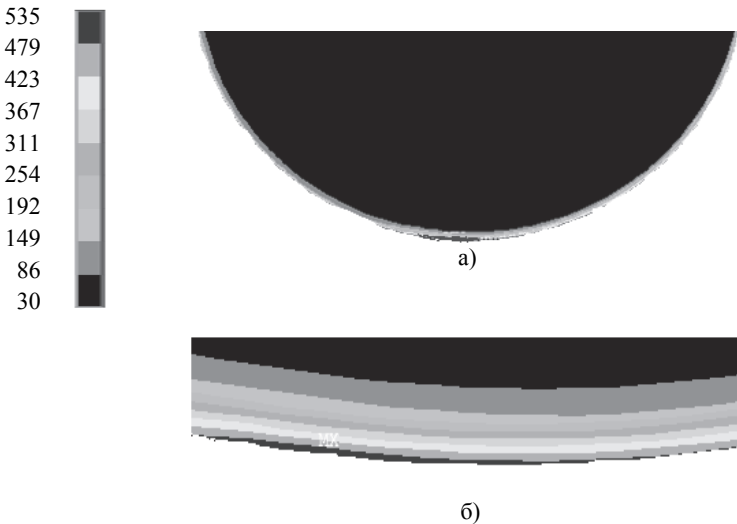


Рис. 4. Распределение температурного поля в валке после 6-ти оборотов – а) в теле валка; б) в области валка, соответствующей очагу деформации

На рис.5 представлено изменение температуры в узлах приповерхностного слоя валка, соответствующих местоположению очага деформации в процессе прокатки. Из графиков (рис. 5-6) следует резкое повышение температуры после первого оборота и плавное её повышение в последующих. Установлено, что с увеличением скорости прокатки от 0.3 до 2.5 м/с величина изменения температуры за каждый оборот на поверхности валка уменьшается от 480°С до 80°С. На глубине от 2.5 мм (рис.6) наблюдается не скачкообразное, а уже монотонное возрастание температуры. На основе данных из анализа теплового состояния рабочих

валков можно сделать вывод о том, что лучшей термоустойчивостью обладают валки последних клеток непрерывной группы, где скорость их вращения существенно выше. Результаты тепловой задачи имеют качественное совпадение с результатами исследований [10].

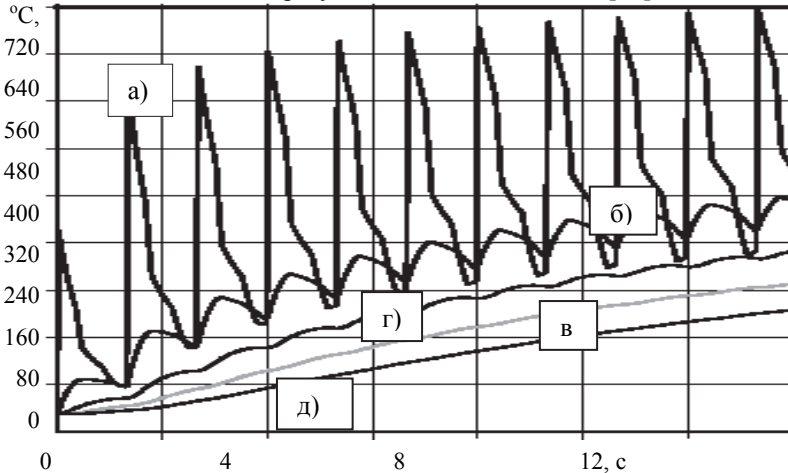


Рис. 5. Изменение температуры в точках приповерхностного слоя валка при $\dot{\alpha} = 10^\circ$, $P = 170 \text{ МПа}$, $v = 0,35 \text{ м/с}$;

а) – на поверхности, б) – на глубине 2.5 мм, в) – на глубине 4 мм, г) – на глубине 6 мм, д) – на глубине 8 мм

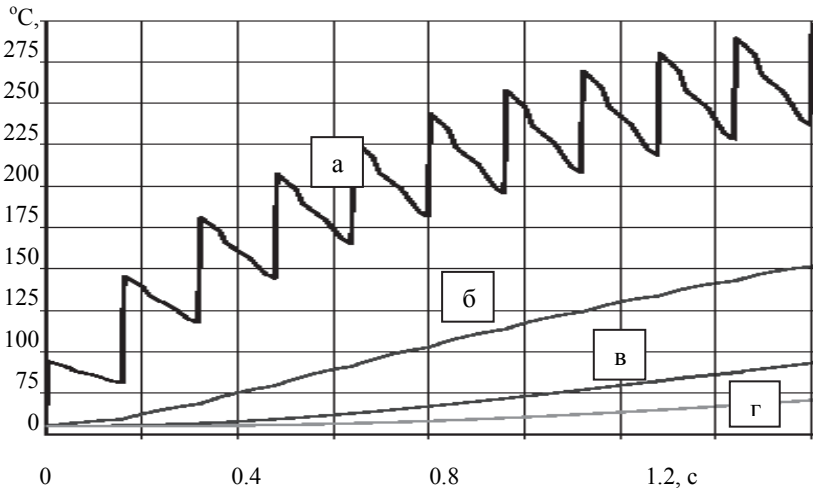


Рис. 6. Изменение температуры в точках приповерхностного слоя валка при $\dot{\alpha} = 10^\circ$, $P = 170 \text{ МПа}$, $v = 2,5 \text{ м/с}$;

а) – на поверхности, б) – на глубине 2.5 мм, в) – на глубине 4 мм, г) – на глубине 6 мм

Термомеханические циклические напряжения.

Результаты термической задачи послужили входными данными для определения термомеханических напряжений. В валке после первого его оборота на глубине 3-6 мм образуются окружные термические растягивающие напряжения в зонах охлаждения водой, при этом растягивающие напряжения больше в зоне активного охлаждения на выходе, чем на входе (рис.7). На рис.8 показаны графики изменения термомеханических напряжений от угловой координаты, возникшие на поверхности валка после третьего оборота.

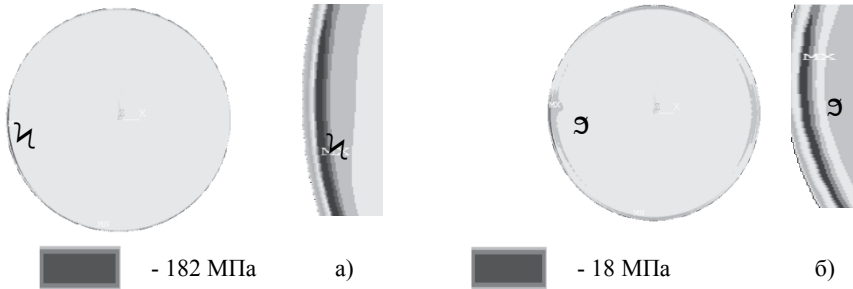


Рис. 7. Окружные термические напряжения в валке, а) – в течение 1-го оборота; б) – в течении 6-го оборота

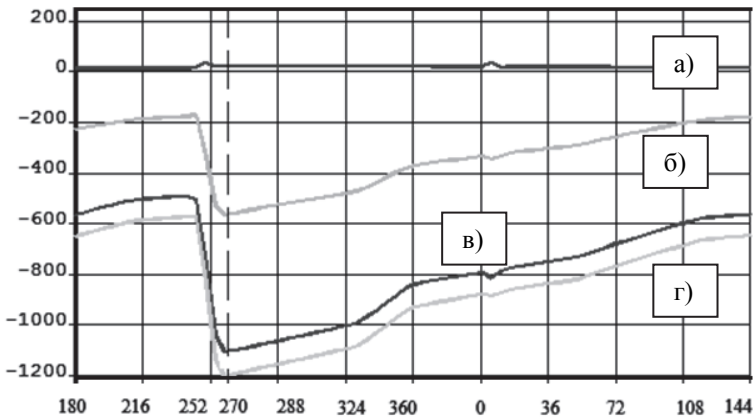


Рис.8. Напряжения на поверхности валка в зависимости от угловой координаты после 3-го оборота, МПа; а) – касательные, б) – контактные, в) – осевые, г) – окружные

С течением времени, после нескольких оборотов, растягивающие напряжения уменьшаются, или вовсе исчезают, а сжимающие увеличиваются вследствие постепенного прогрева приповерхностного слоя валка. В зоне разогрева в ОД в валке возникают сжимающие

температурные напряжения величиной 11-800 МПа. В зонах охлаждения водой возникают растягивающие напряжения 6-85 МПа.

Наибольшие напряжения по величине - осевые (σ) и окружные (ε), которые возникают, в основном, только за счет тепловых нагрузок. Контактные напряжения (δ) возникают только вследствие механических воздействий от полосы и опорного вала. Характер распределения напряжений в валке совпадает с известными данными [11].

Выводы

В работе предложен упрощенный подход для расчета температурных напряжений в рабочих валках станов горячей прокатки на основе модели плоских конечных элементов.

В результате термического анализа рабочего вала в процессе горячей прокатки было установлено, что наибольшие температурные градиенты развиваются в приповерхностной области рабочего вала глубиной до 10 мм.

Отличительной особенностью модели является возможность исследования влияния циклических напряжений в приповерхностном слое вала при каждом его обороте. Сжимающие напряжения возникают в зоне нагрева, а растягивающие - в зоне охлаждения. Наиболее опасные растягивающие напряжения возникают на глубине 3-6 мм от поверхности вала в первых 1-3-х его оборотах.

Разработанную модель можно использовать при анализе усталостного разрушения рабочих валков, вызванного циклическими тепловыми и механическими нагрузками.

1. *Williams RV, Boxall M.* Roll surface deterioration in hot strip mills. // J Iron Steel Inst. – 1965. Vol.203. pp. 369 – 377.
2. *Stevens PG, Ivens KP, Harper P.* Increasing work-roll life by improved roll cooling practice.// J Iron Steel Inst. – 1971. Vol. 209. pp. 1-11.
3. *Chang DF.* Thermal stresses in work rolls during the rolling of metal strip.// J Mater Process Tech 1999; Vol. 94. pp. 45-51.
4. *Galantucci LM, Tricarico L.* Thermo-mechanical simulation of a rolling process with a FEM approach.// J Mater Process Tech 1999; Vol. 92-93. pp. 494-501.
5. *Sun CG, Yun CS, Chung JS, Hwang SM.* Investigation of thermomechanical behavior of a work roll and roll life in hot strip rolling.// Metall Mater Trans A 1998. Vol. 29. Issue 9. pp. 2407-2424.
6. *Li CS, Liu XH, Wang GD, He XM.* Three dimensional FEM analysis of work roll temperature field in hot strip rolling.// Mater Sci Tech 2002; Vol. 18. pp. 1147-1150.
7. *Li CS, Yu HL, Deng GY, Liu XH, Wang GD.* Numerical simulation of temperature field and thermal stress field of work roll during hot strip rolling. // J Iron Steel Res Int 2007. Vol. 14. Issue 5. pp. 18-21.
8. *Lee JD, Manzari MT, Shen YL, Zeng W.* A finite element approach to transient thermal analysis of work rolls in rolling process.// J Manuf Sci Eng, Trans ASME 2000. Vol. 122. pp. 706-716.

9. *Стали и сплавы*. Марочник: Справ. изд. / В. Г. Сорокин и др.: Науч. С77 ред. В. Г. Сорокин, М. А. Гервасьев – М.: «Интернет Инжиниринг», 2001, – 608 с.: ил.
10. *D. Benasciuttia, E. Brusab, G. Bazzaroc. /Finite elements prediction of thermal stresses in work roll of hot rolling mills.// Procedia Engineering 2010. Vol. 2. pp. 707–716.*
11. *Расчет и следование прокатных валков*. 2-е изд. / А. В.Третьяков, Э.А.Гарбер, Г. Г.Давлетбаев. – М.: «Металлургия», 1976. –256с.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук С.А.Воробьем*

І.Ю.Приходько , М.О.Дедик

Розрахунок циклічних термомеханічних напружень у робочих валках в процесі гарячої прокатки смуг методом кінцевих елементів

З метою зниження обчислювального навантаження при моделюванні процесу гарячої прокатки смуг розроблено спрощені моделі розрахунку при збереженні високої точності результатів. Для розрахунків використано спрощений чисельний метод кінцевих елементів і модель плоского деформованого стану валка. Відмінною особливістю моделі є можливість дослідження впливу циклічних напружень в приповерхневому шарі валка при кожному його обороті. В результаті термічного аналізу робочого валка в процесі гарячої прокатки встановлено, що найбільші температурні градієнти розвиваються в приповерхневій області робочого валка глибиною до 10 мм. Напруження стиску виникають у зоні нагріву, а розтягіння – у зоні охолодження. Найбільш небезпечні напруження розтягіння виникають на глибині 3-6 мм від поверхні валка в перші 1 - 3 - обороти. Розроблену модель можна використовувати при аналізі втомного руйнування робочих валків, що викликане циклічними тепловими і механічними навантаженнями.