

УДК 621.74:
669.15–196

N.A. Feoktistov
A.A. Yumabaev
E.V. Skripkin
A.V. Monastyrsky

Аннотация

Summary

Применение компьютерного моделирования для оценки напряженного состояния литого прокатного валка

Assessment of the stress state of a rolling roll using computerized modeling

Н.А. Феоктистов, А.А. Юмабаев, Е.В. Скрипкин (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова), А.В. Монастырский (ГК СиСофт, Москва)

Рассмотрены результаты компьютерного моделирования остаточных напряжений прокатного валка (ПВ). При термообработке ПВ, полученных центробежным литьем, даже незначительные нарушения технологических параметров производства могут привести к появлению трещин в отливке (в результате совокупного действия остаточных напряжений и деформаций). Для оценки факторов, влияющих на уровень остаточных напряжений в бочке ПВ провели компьютерное моделирование с применением инструмента (СКМ ЛП) «ПолигонСофт». При моделировании определены динамика изменения температур, напряженно-деформированное состояние по всему объему ПВ и уровень остаточных напряжений в рабочем слое. Выяснены максимальные градиенты температур, которые возникают при переходе от более горячих торцевых к более холодным центральным областям рабочего слоя валка, где на этих участках возникают наибольшие напряжения.

Ключевые слова

Биметаллический прокатный валок, комбинированная литейная форма, рабочий слой, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, напряжения, деформация.

The article discusses the results of computer modeling of residual stresses of a rolling roll. When producing rolling rolls by centrifugal casting, even minor violations of technological production parameters can lead to the appearance of cracks in the casting body. These are mainly cracks and chips formed during heat treatment as a result of the combined action of residual stresses and deformations. To assess the factors influencing the level of residual stresses in the roll barrel, after crystallization, computer modeling was carried out using the PolygonSoft tool (SKM LP). The purpose of this work is to analyze the influence of various factors on the formation of a rolling roll in a casting mold, as well as to evaluate the possibility of controlling these factors to optimize casting technology and obtain higher-quality workpieces. In the process of modeling, the dynamics of temperature changes, the stress-strain state throughout the entire volume of the roll and the level of residual stresses in the working layer were determined. The maximum temperature gradients that arise during the transition from hotter end to colder central regions of the working layer of the roll, where the greatest stresses arise in these areas, have been determined.

Key words

Bimetallic rolling roll, combined mold, working layer, core, computer modelling, finite element method, voltage, deformation.

Введение

Прокатные валки (ПВ) – основной рабочий инструмент станов горячей и холодной прокатки. Рабочие валки осуществляют пластическую деформацию металла в горячем или холодном состоянии.

В металлургии ПВ классифицируют следующим образом [1]:

- по назначению – на обжимные сортовые и листовые;
- по роду выполняемой работы – на рабочие и опорные;
- по конструктивным особенностям – с внутренним осевым отверстием или без него, цельные, двухслойные, составные; цельнолитые или бандажированные;
- по материалу: чугунные, стальные и твердосплавные;
- по технологии изготовления: литые, кованные, термически обработанные и необработанные;
- по классу твердости:
 - чугунные – на мягкие, полутвердые и твердые;
 - стальные – на группы: А, Б, В, Г.

Опорные обеспечивают прочность и жесткость, а также разгрузку рабочих валков от усилий, возникающих при прокатке.

Объект исследования – трехслойный прокатный валок, представляющий собой биметаллическое изделие с рабочим и промежуточным слоями, сердцевинной, выполненной из разных сплавов. Рабочий слой изготавливается из износостойкого сплава (NiCr, NiCr-CE, NiCr), промежуточный – из легированного чугуна, а сердцевина – из высокопрочного чугуна.

Современная технология производства ПВ заключается в изготовлении рабочего и промежуточного слоев на центробежной машине с последующей сборкой формы и заливкой в нее сердцевины. Разработка такой технологии позволила использовать износостойкие и высокотвердые сплавы для рабочего слоя и более дешевый высокопрочный чугун – для сердцевины [2].

С точки зрения литья этот технологический процесс является сложным, так как может состоять из двух или трех стадий. В результате на отливках периодически возникают дефекты. Поэтому совершенствование технологии производства – перспективное направление для современных исследований.

Цель работы – анализ влияния различных факторов на формирование ПВ в литейной форме и оценка возможности управления этими факторами

для оптимизации литейной технологии и получения высококачественных отливок.

Теоретическая часть

Производство ПВ – сложный процесс. Незначительные нарушения технологии приводят к появлению следующих дефектов [2...5]:

- при плавке и заливке – раковины и засоры, пригар, горячие трещины, неметаллические включения, несвариваемость слоев;
- при механообработке – сколы на шейке валка и бочке, несоответствие размеров чертежу, сетка шлифовальных трещин и др.;
- при термообработке – неоднородная структура, большие остаточные напряжения и др.;
- при эксплуатации – усталостные сколы, скалывание отдельных участков бочки, полосовые сетки разгара и др.

Литейные дефекты, возникающие в пределах припусков, исправляют механообработкой. Дефекты на рабочей поверхности бочек валков, как правило, не подлежат исправлению.

Значительную долю дефектов, образующихся на ПВ, составляют трещины. Они могут возникать в процессе кристаллизации расплава в литейной форме и при термообработке отливок. Основная причина появления трещин – остаточные напряжения, а также связанные с ними накопленные пластические деформации, возникающие при термообработке. Совокупность этих факторов формирует напряженно-деформационное состояние (НДС) ПВ.

На начальном этапе производства формирования литой структуры и возникновение остаточных напряжений определяется следующими основными технологическими параметрами [6]: температурными режимами заливки рабочего слоя и сердцевины; геометрическими характеристиками изделия; скоростью охлаждения отливки в форме; механическими свойствами применяемых материалов.

Оценить влияние этих факторов на уровень остаточных напряжений, в том числе их качественное распределение по бочке валка, удобнее всего сделать при помощи компьютерного моделирования. Современные методы компьютерного моделирования литейных процессов позволяют анализировать теплофизические, гидродинамические и кристаллизационные процессы, которые происходят при заполнении полости литейной формы расплавом и затвердевании отливки [7]. Программные комплексы для моделирования

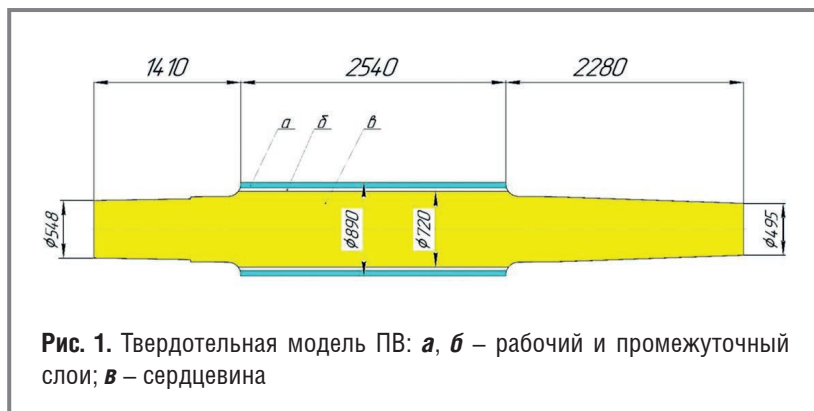


Рис. 1. Твердотельная модель ПВ: *a, б* – рабочий и промежуточный слой; *в* – сердцевина

литейных процессов работают на основе различных методов расчета, например, метода конечных разностей, конечных элементов, контрольных объемов [8].

Методика проведения компьютерного моделирования

Объект исследования – листопрокатный валок с рабочим слоем из высокохромистого чугуна. Он состоит из трех слоев – рабочего, промежуточного и сердцевины. Рабочий слой получают центробежным литьем из высоколегированного чугуна с 15...17% Cr, промежуточный – из легированного чугуна. Сердцевина заливается гравитационным способом из высокопрочного чугуна. Ориентировочная масса рабочего слоя – 4300 кг, промежуточного – 450 кг, а сердцевины – 12 300 кг (рис. 1).

В процессе термообработки на поверхности рабочего слоя возникают сколы и трещины (рис. 2) из-за напряжений, превышающих предел прочности материала при нагреве или охлаждении. Они образуются при затвердевании и термообработке отливки, а также при высокотемпературных воздействиях во время работы ПВ в клетке стана. Для качественной оценки остаточных напряжений провели компьютерное моделирование процесса производства валка.

В качестве инструмента применяли систему компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «Полигон Софт». Расчет в программе осуществляли методом конечных элементов (МКЭ), позволяющим смоделировать процессы кристаллизации металла в литейной форме [9]. Использование МКЭ позволяет исследовать тела, состоящие из разных материалов,

анализировать области любой формы, применять различные граничные условия. Это достигается за счет разбиения исходной геометрии отливки на конечные элементы (в «Полигон Софт» используются тетраэдры с четырьмя вершинами). В расчете применяются независимые сетки для всех тел расчетной области, поэтому возможно моделирование контакта между телами. Это позволяет довольно точно оценить качественное распределение и количественные характеристики остаточных напряжений [10].

Подготовку к моделированию и построение сеточной модели проводили при помощи встроенного сеточного генератора «SALOME». Для полученной объемной сеточной модели элементов валка и литейной формы в препроцессоре «Мастер» задали начальные и граничные условия параметров литья: температуру заливки, температуру рабочего слоя, характеристики сплава, комбинированной литейной формы и т.д.

С помощью постпроцессора «Мираж» наблюдали результаты в контрольных точках в виде последовательно изменяющихся значений температуры, интенсивности напряжений, деформаций в каждый расчетный момент времени. Динамику изменения температур измеряли с помощью датчиков, установленных по центру рабочего слоя в контрольных точках, которые располагались на расстояниях от торца: 1 ~ 20; 2 ~ 635; 3 ~ 1270; 4 ~ 1905 и 5 ~ 2520 мм.

Для определения поля температур использовали уравнение теплопроводности Фурье (1) с фазовым переходом (2):

$$\partial T / \partial t = a \nabla^2 T + q / \rho C, \quad (1)$$

где $a = \lambda / \rho C$ – коэффициент



Рис. 2. Сколы и трещины на ПВ

температуропроводности; q_v – мощность внутренних источников тепла; C – теплоемкость;

$$q_v = \rho L \frac{df_s}{dT} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

где L – количество теплоты, выделяющейся при фазовом переходе (затвердевании); f_s – доля твердой фазы.

На внешних границах теплообмен со средой рассчитывается по закону Ньютона (3) и закону теплового излучения Стефана-Больцмана (4):

$$q = a_k(T_2 - T_1), \quad (3)$$

где q – плотность теплового потока; a_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией; T_1 – температура в зоне контакта *рабочий слой – расплав*; T_2 – температура в зоне контакта *рабочий слой – кокиль*.

$$q = \varepsilon \sigma (T_2^4 - T_1^4), \quad (4)$$

где q – плотность теплового потока; ε – приведенное значение степени черноты каждой из поверхностей, участвующей в процессе лучистого теплообмена; $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Вт/($\text{м}^2 \times \text{K}^4$) – постоянная Стефана-Больцмана.

Расчет остаточных напряжений производили при помощи решателя напряжений «Гук» в контрольных точках рабочего слоя, располагающихся на равных расстояниях от торца бочки валка: 1 ~ 20; 2 ~ 317,5; 3 ~ 635; 4 ~ 952,5; 5 ~ 1270; 6 ~ 1587,5; 7 ~ 1905; 8 ~ 2222,5 и 9 ~ 2520 мм.

Комплекс упругопластических характеристик для каждой температуры отливки, необходимых для расчета НДС, приведен в виде графиков на рис. 3 [11, 12].

Результаты компьютерного моделирования формирования напряжений на бочке ПВ из NiCr-стали

Основа для расчета напряжений и деформаций – температурные поля формирующейся

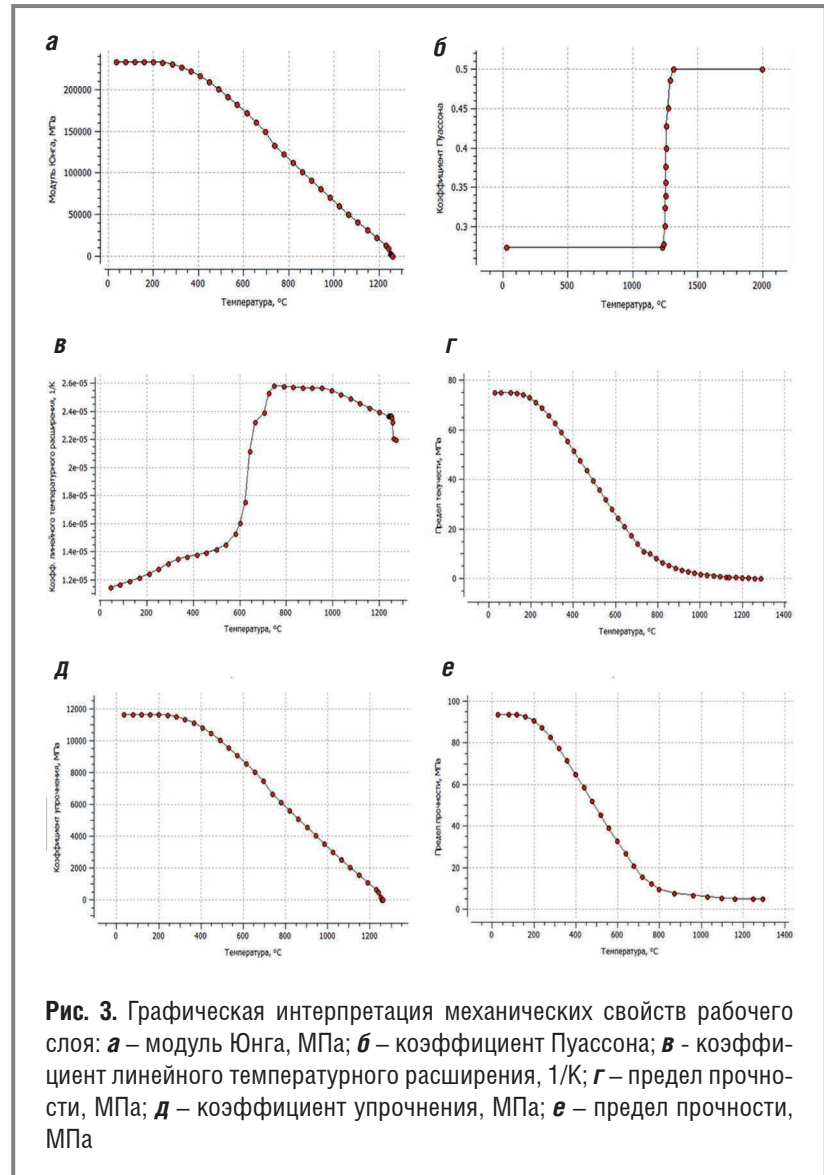


Рис. 3. Графическая интерпретация механических свойств рабочего слоя: **а** – модуль Юнга, МПа; **б** – коэффициент Пуассона; **в** – коэффициент линейного температурного расширения, 1/К; **г** – предел прочности, МПа; **д** – коэффициент упрочнения, МПа; **е** – предел прочности, МПа

во время затвердевания и охлаждения отливки. При затвердевании температура внутри отливки распределяется неравномерно, что вызвано ее разностенностью, различными материалами литейной формы, продолжительностью заливки и другими факторами. В результате в отливке возникают деформации, формирующие напряжения [13].

Для моделирования процессов затвердевания и охлаждения отливки ПВ заданы начальные значения температуры формовочной смеси – 20°C;

изложницы – 400°C; рабочего слоя – 1150°C; сердцевины – 1350°C [14].

Расчеты проводили до 400°C. До этой температуры рабочий слой охлаждался за 18 ч, а сердцевина валка – за 23 ч.

Тепловые поля рассчитывали с максимальным приближением к условиям реального производства. После моделирования построили кривые охлаждения рабочего слоя ПВ (рис. 4).

Полученные кривые изменения температур в рабочем слое условно разделили на четыре области, в которых рассчитали

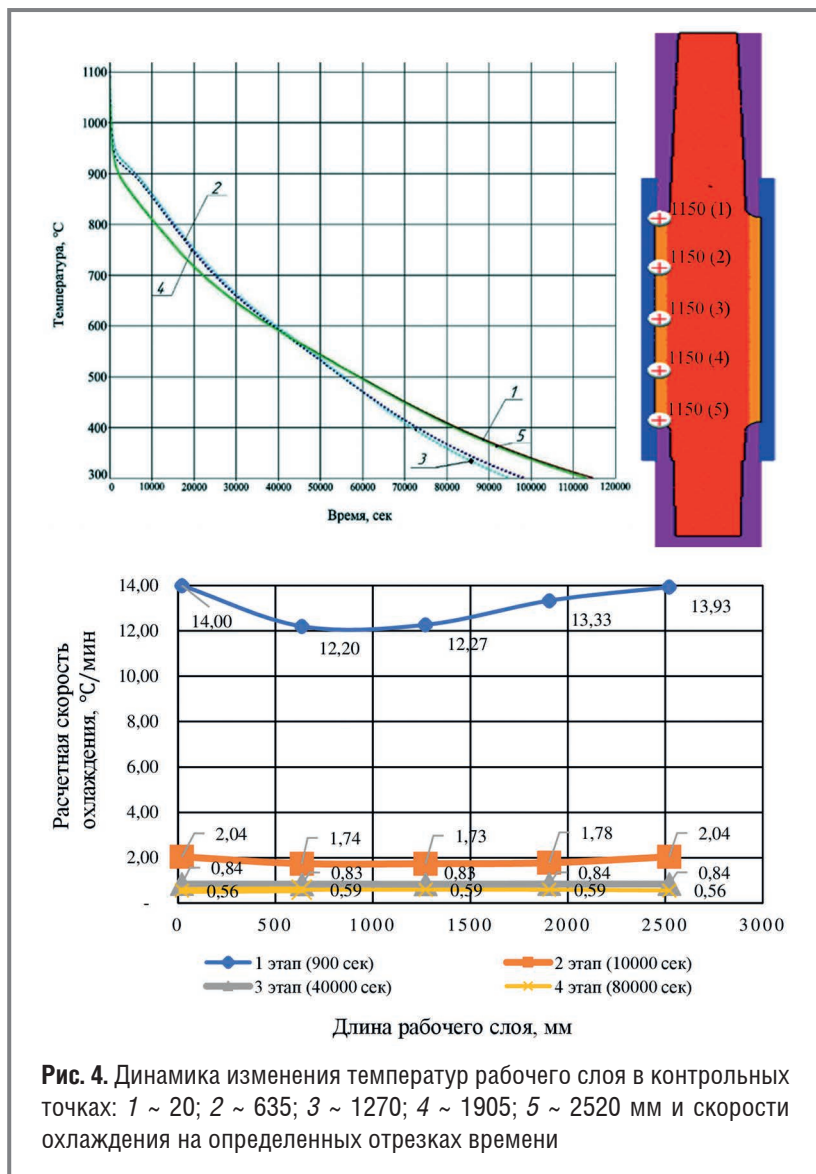


Рис. 4. Динамика изменения температур рабочего слоя в контрольных точках: 1 ~ 20; 2 ~ 635; 3 ~ 1270; 4 ~ 1905; 5 ~ 2520 мм и скорости охлаждения на определенных отрезках времени

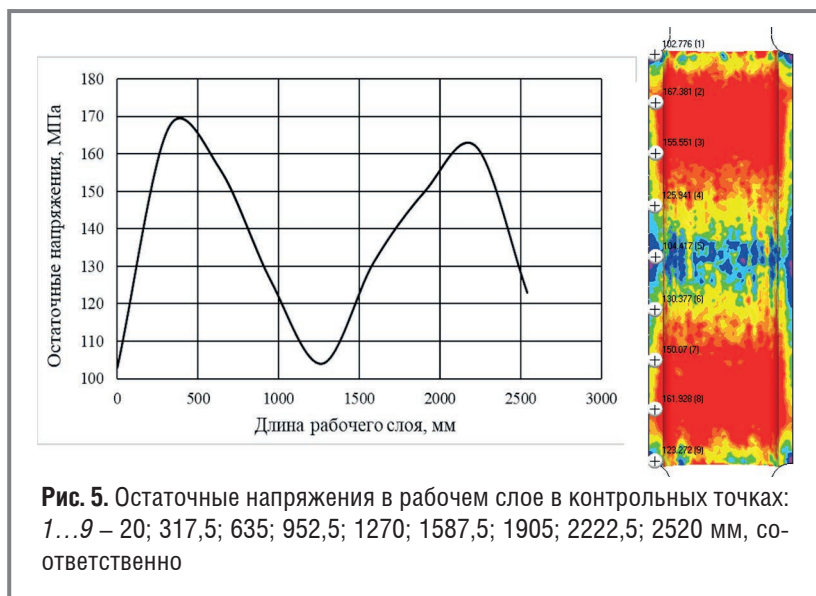


Рис. 5. Остаточные напряжения в рабочем слое в контрольных точках: 1...9 – 20; 317,5; 635; 952,5; 1270; 1587,5; 1905; 2222,5; 2520 мм, соответственно

скорости охлаждения расплава в литейной форме.

На *первом этапе* температура рабочего слоя после заливки быстро снижается – в течение 15 мин со скоростью 13°C/мин. Согласно закону Ньютона, мощность теплообмена между двумя телами тем больше, чем сильнее отличаются их температуры. Другими словами, после заливки расплавом сердцевины валька разность температур между литейной формой и рабочим слоем очень большая, по этой причине теплообмен между телами протекает с большой скоростью. Изложница от рабочего слоя ПВ нагревается до 700°C за 2 ч, после чего ее нагрев замедляется.

Второй этап сопровождается более медленным охлаждением: скорость охлаждения 2,04°C/мин вблизи торцов 1 и 5 и 1,75°C/мин – вблизи точек 2, 3 и 4. Это связано с тем, что торцы отливки обладают более развитой площадью контакта, в том числе литейные формы шеек имеют температуру окружающей среды после сборки для стационарного литья.

Третий этап отличается равномерной скоростью охлаждения по всей длине рабочего слоя – 0,84°C/мин. На этом промежутке времени практически выравниваются температуры между отливкой и литейной формой.

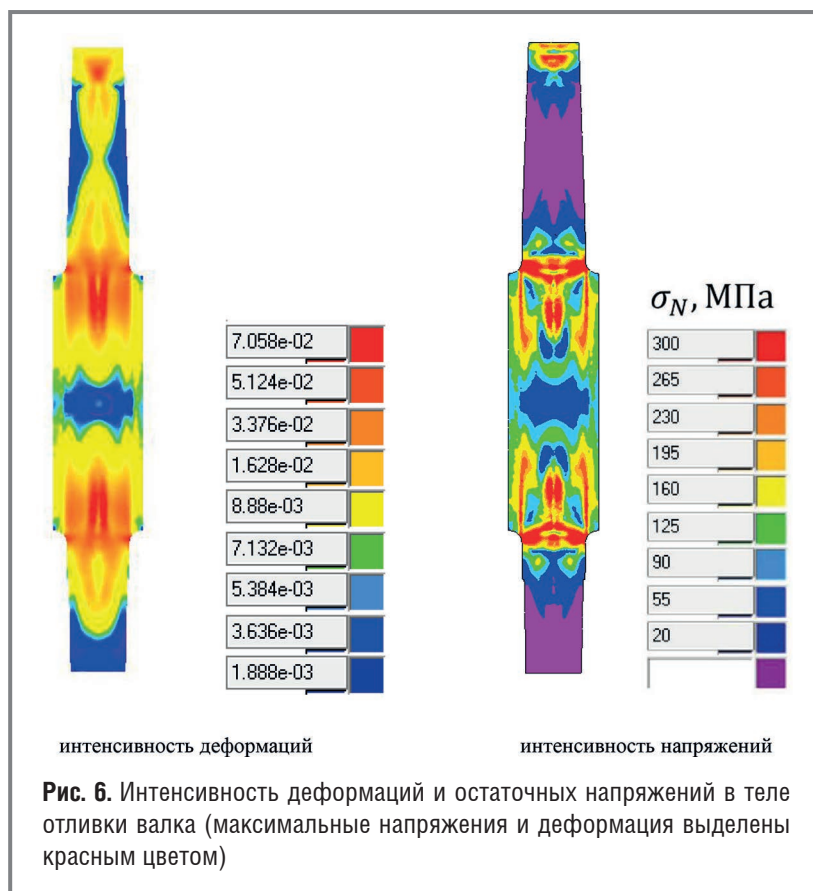
Четвертый этап характеризуется равномерной скоростью охлаждения во всех контрольных точках – 0,58°C/мин. Небольшое отклонение обусловлено разной теплопроводностью материалов – теплопроводность формовочной смеси 0,17 Вт/(м×К), изложницы – 29 Вт/(м×К) [15]. Поэтому контактирующий рабочий слой валька с изложницей

охлаждается быстрее. Процесс охлаждения прокатного валка до 400°C занимает 23 ч. В этот промежуток времени в теле отливки происходят теплофизические процессы, которые влияют на структурно-фазовое состояние валка, вследствие этого происходит изменение объема структурного состава, приводящее к напряженному состоянию валка. На следующем этапе провели анализ остаточных напряжений после охлаждения валка до 50°C (рис. 5).

Анализ данных показывает, что минимальные остаточные напряжения образуются в торцевых частях (точки 1 и 9) и средней части рабочего слоя (точка 5), где значения остаточных напряжений не более 100 МПа. Максимальные остаточные напряжения (более 160 МПа) наблюдаются на расстояниях 300 мм (точки 2 и 8) от нижнего и верхнего торцов рабочего слоя.

Следует отметить, что такой экстремальный характер распространения остаточных напряжений связан с величиной температурного градиента по длине бочки валка. Учитывая, что нагрев валка с торцевой и рабочей частей бочки приводит к локальному выравниванию температур в торцевой зоне, градиент в этом месте минимален. Как следствие, в торцевых частях наблюдаются невысокие остаточные напряжения (рис. 6).

Аналогичную качественную картину видим и в центре бочки валка. Здесь нагрев осуществляется с рабочей поверхности и идет значительно медленнее, чем в торцевых частях. Как следствие, температурный градиент по радиусу также невысок. Максимальные градиенты



возникают при переходе от более горячих торцевых к более холодным центральным областям рабочего слоя валка; именно в данном месте возникают максимальные напряжения.

НДС валка формируется вследствие охлаждения металла, а также затрудненной усадки и фазовых превращений.

Деформации наиболее интенсивно протекают в горячих зонах отливки, т.е. в тепловых узлах, где кристаллизация сплава заканчивается в последнюю очередь. Такими зонами в отливке валка являются средние части верхних и нижних шеек (см. рис. 6). В результате в этих частях отливки наблюдается затрудненная усадка, которая, в свою очередь, создает напряженные поля в граничных условиях рабочего слоя и сердцевинных ПВ.

Таким образом, полученные области максимальных напряжений в теле отливки в ходе моделирования близко согласуются с образовавшимися дефектами во время производства ПВ (см. рис. 2).

Выводы

- Компьютерное моделирование позволило более эффективно и глубоко изучить процессы, протекающие в отливке, и выявить наиболее опасные зоны формирования сколов и трещин.

- С помощью СКМ ЛП «Полигон Софт» рассчитаны температурные поля и НДС состояния ПВ. Это позволило изучить динамику охлаждения отливки и температурные изменения литейной формы, а также остаточные напряжения после литья. Расчеты показали, что в начале скорость

охлаждения рабочего слоя составляет 13°C/мин, далее она замедляется до 0,56°C /мин. При этом до 400°C отливка охлаждается за 23 ч. Остаточные напряжения по длине рабочего слоя составляют 100...160 МПа, а на границе рабочего слоя и сердцевины – 300 МПа.

- Установлено, что область концентраций максимальных остаточных напряжений соответствует местам нарушений сплошности отливки, что позволяет идентифицировать рассматриваемое напряженное состояние, как одну из причин трещинообразования рабочего слоя ПВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вдовин К.Н.** Прокатные валки. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова. 2013. 443 с.
2. **Вдовин К.Н., Куряев Д.В., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А.** Прокатные валки. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2018. 335 с.
3. **Долгополова Л.Б., Скурихин А.В., Шаповалов А.Н.** Анализ брака литых чугуновых валков (Ч. 1) // Теория и технология металлургического производства. 2014. №1(14). С. 53–56.
4. **Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Тришевский О.И.** Разработка методов повышения эксплуатационной стойкости изделий из высокохромистого чугуна // Автомобильный транспорт (Харьков). 2012. №31. С. 136–146.
5. **Тухватуллин И.Х., Долгополова Л.Б., Баталов В.Г., Хилова А.Л.** Применение искусственных нейронных сетей для обработки и оптимизации технологических параметров изготовления чугуновых прокатных валков // Литейные процессы: Межрегиональный сб. науч. тр. под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2004. Вып. 4. С. 172–174.
6. **Бахметьев В.В., Цыбров С.В., Авдиенко А.В. и др.** Производство прокатных биметаллических валков ЗАО «Механоремонтный комплекс» для ОАО «ММК» // Литейное производство. 2007. №1. С. 11–14.
7. **Жижкина Н.А., Илюшкин Д.А., Зенцова Е.А.** Виртуальное моделирование центробежного литья валков // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. №1(49). С. 22–27.
8. **Никаноров А.В.** Сравнительный анализ компьютерных программ для моделирования литей-

ных процессов // Вестник ИргТУ. 2018. №11(142). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-kompyuternyh-programm-dlya-modelirovaniya-liteynyh-protseessov> (дата обращения: 27.01.2023).

9. **Монастырский А.В., Власов Ю.В.** Система компьютерного моделирования литейных процессов // Автоматизация в промышленности. 2022. №5. С. 54–58.

10. **Монастырский А.В.** О современных методах разработки и оптимизации технологических процессов в литейном производстве // Литейное производство. 2010. №5. С. 19–22.

11. **Илюхин В.Д., Монастырский А.В.** Компьютерное моделирование рассредоточения деформаций в методе борьбы с горячими трещинами // Литейное производство. 2021. №3. С. 29–34.

12. **Пантелеева А., Ковалевич Е.** Компьютерное моделирование напряженного состояния изложниц для слитков высоколегированной стали // САПР и графика. 2013. №8(202). С. 84–85.

13. **Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А. и др.** Моделирование процессов кристаллизации и структурообразования прокатного валка из заэвтектоидной стали // Теория и технология металлургического производства. 2020. №1(32). С. 18–25.

14. **Еланский Г.Н., Еланский Д.Г.** Строение и свойства металлических расплавов: уч. пособие для вузов. М.: Изд-во «Юрайт», 2023. 212 с.

Сведения об авторах

Феоктистов Н.А. – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Литейных процессов и материаловедения», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. Тел.: +7 (3519) 29-85-30. E-mail: fna87@mail.ru

Юмабаев А.А. – аспирант, ассистент той же кафедры. Тел.: +7 (3519) 29-85-30. E-mail: yumabaev.azamat95@gmail.com

Скрипкин Е.В. – аспирант той же кафедры. Тел.: +7 (3519) 29-85-30.

Монастырский А.В. – канд. техн. наук, зам. руководителя Отдела машиностроения ГК «СиСофт», Москва. Тел.: +7 (495) 069-4444. E-mail: avmon@csoft.ru