

УДК 621.746.55.:621.771.07

Т.С. Скобло, А.К. Автухов, Е.Л. Белкин*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
имени Петра Василенка***МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕРМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОКАТНЫХ ВАЛКАХ ПРИ ИХ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ**

Разработана методика расчета термических деформаций и температурных напряжений возникающих во время кристаллизации в прокатных валках с гладкой бочкой. Данная методика дает возможность при расчетах учитывать объемность задачи и возникновение пластических деформаций от неравномерности распределения при кристаллизации температур и структурных превращений. Полученные расчетные формулы позволяют определить развитие термических деформации и температурных напряжений в отливках прокатных валков во время кристаллизации.

Ключевые слова: кристаллизации чугунных отливок, термическая деформация, термические напряжения, распределения температуры, структурные превращения

Т.С. Скобло, А.К. Автухов, Е.Л. Белкин*Харківський національний технічний університет сільського господарства
імені Петра Василенка***МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТЕРМІЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ І ТЕМПЕРАТУРНИХ НАПРУГ У ПРОКАТНИХ ВАЛКАХ ПРИ ЇХ КРИСТАЛІЗАЦІЇ**

Розроблено методику розрахунку термічних деформацій і температурних напружень, що виникають під час кристалізації в прокатних валках з гладкою бочкою. Дана методика дає можливість при розрахунках враховувати об'ємність завдання і виникнення пластичних деформацій від нерівномірності розподілу при кристалізації температур і структурних перетворень. Отримані розрахункові формули дозволяють визначити розвиток термічних деформацій і температурних напружень у виливках прокатних валків під час кристалізації.

Ключові слова: кристалізації чавунних виливків, термічна деформація, термічні напруги, розподілу температури, структурні перетворення

T.S. Skoblo, A.K. Avtukhov, E.L. Belkin*Kharkiv National Technical University of Agriculture named after P. Vasilenko***THE METHOD OF CALCULATION THERMAL DEFORMATIONS AND THERMAL STRESSES IN THE MILL ROLLS DURING CRYSTALLIZATION**

The method of calculation thermal deformations and thermal stresses which arises during crystallization in the mill rolls with a flat body of roll barrel was designed. This method allows to consider the size of the task and the occurrence of plastic deformation from unevenness of distribution during crystallization and structural transformation when calculating. The obtained formulas allow us to determine the development of the thermal deformation and thermal stresses in the casting mill rolls during crystallization. The developed technique should be used in the calculation of new technological processes and casting parameters to minimize the permanent thermal deformation and thermal stresses, which provide energy resources saving, to exclude use of high-cost thermic processes.

Keywords: crystallization of iron casting, thermal deformation, thermal stresses, temperature distribution, structural transformation

Постановка проблеми. При кристаллизации чугунных отливок листопркатных валков, вследствие неравномерного распределения температуры и протекания структурных превращений в значительном интервале – 500-700°C, возникают напряжения, влияющие на формирование свойств и уровень твердости в валке. Учитывая жесткие требования к эксплуатационным характеристикам прокатных валков, включающие, в первую очередь, высокую износостойкость и твердость контактной поверхности, необходимо регламентировать кинетику изменения температуры в изделии во время охлаждения отливки. Для этого важно оценить термические деформации и напряжения, возникающие при их кристаллизации [1].

Анализ исследований и публикаций. Проведенный анализ литературных источников показал, что в настоящее время выполнено достаточно большое количество разработок по прогнозированию остаточных напряжений в прокатных валках. Но следует отметить, что они, в основном, касаются определения остаточных напряжений и моделирования структурного состояния валков после термической обработки [2-6]. В работах [7,8] выполнено математическое моделирование кристаллизации отливок. Но эти разработки касаются производства сортопркатных валков отливаемых в профилированные формы или формы с закладными кольцами, что существенно отличается от листопркатных, отливаемых центробежным методом. Методика расчета термических деформаций и температурных напряжений в валках отсутствует.

Цель работы – разработать методику расчета термических деформаций и температурных напряжений при кристаллизации в двухслойных прокатных валков отлитых центробежным способом.

Изложение основного материала. За основу расчета термических деформаций и напряжений принята методика, описанная в работе [9], но существенно переработанная.

Идея В.В. Абрамова основана на том, что сумма проекций сил от неравномерного распределения температур на каждую ось координат должна равняться нулю. Например, если брусок даже неравномерного сечения по длине нагрет неравномерно, то можно легко найти такую среднюю температуру, относительно которой минимум проекций сил будет равен нулю. То есть,

$$\sum_{k=1}^n [\beta(T_k - T) m_k F_k] = 0, \text{ где} \quad (1)$$

T_k - температура в точке с индексами k ;

β - коэффициент линейного расширения;

T - искомая температура;

m_k - модуль упругости, зависящий от температуры, принятый в работе рассчитывали по эмпирической формуле

$$m_k = (23.023 - \frac{3706}{10^6} T_k - \frac{892}{10^8} T_k^2) \cdot 1000 \quad (2)$$

F_k - площадь сечения в точке k .

Деформация от тепловой нагрузки равна

$$\varepsilon_k = \beta(T_k - T) \quad (3)$$

Напряжение тепловой нагрузки рассчитывается по закону Гука:

$$\sigma_k = m_k \varepsilon_k \quad (4)$$

Сила S_k равна произведению напряжения на площадь:

$S_k = \sigma_k F_k = m_k \beta(T_k - T) F_k$, то есть, под знаком суммы действует условие равновесия сил

$\sum_{k=1}^n S_k = 0$. Таким образом, искомое значение T , из приведенной выше суммы, определяли по формуле:

$$T = \frac{\sum_{k=1}^n \beta T_k m_k F_k}{\sum_{k=1}^n m_k F_k} \quad (5)$$

Однако, принцип В.В. Абрамова многое не учитывает. Например, объемность задачи и возникновение пластических деформаций от неравномерности распределения температур при кристаллизации и - от структурных превращений. Поэтому естественным образом метод В.В. Абрамова можно обобщить с помощью вариационного принципа минимума работы деформации. Кроме того, в теории пластичности существует две параллельные теории: одна деформационная, по которой сделаны приведенные выше выкладки, другая - теория пластического течения. Второе обобщение принципа В.В. Абрамова относится именно к последней теории. Ее еще можно назвать теорией приращения деформаций, если под скоростью деформации понимать ее приращение за одинаковый период времени. При достаточно малом промежутке времени приращение деформации приближенно будет равно скорости деформации. Однако, к величине промежутка времени нужно предъявить еще дополнительные требования. Одно из них – промежуток, который должен быть такой, чтобы температурная в данный момент деформация не очень сильно превышала предельно упругую. Это требование не очень принципиальное, но желательное для быстрого поиска средней деформации, обеспечивающей равновесие или минимум ее работы в вариационной постановке задачи. С другой стороны, промежуток времени, о котором идет речь, не должен быть и слишком маленьким, чтобы не

препятствовать релаксации напряжений. Под релаксацией напряжений в этом случае понимаем пластическую разгрузку. Если деформация превышает предельно упругую, то после разгрузки она равна предельно упругой. На самом деле она немного больше предельно упругой за счет упрочнения. Многочисленные расчеты, проведенные с помощью методики такой жестко пластической разгрузки показали ее работоспособность как при изгибе, например, рельсов на холодильнике, размещенные после прокатки, так и при правке проката[1].

Остается еще случай структурных превращений. В этом варианте происходит структурная деформация, скорее всего, не меньше предельно упругой. По известным публикациям, она находится в пределах 0.001-0.002. Для случая структурных деформаций, как показывают наши многочисленные расчеты, ее нельзя распределять по времени в пределах фазовых превращений, а следует учитывать один раз – сразу после окончания превращений. То есть, промежуток времени, о котором идет речь, не имеет значения.

Исходя из вышесказанного, запишем вариационный принцип в виде:

$$A = \sum_{k=1}^n [\beta(T_{kl-1} - T_{kl} - \Delta T_l) + \varepsilon_{okl-1}]^2 m_{kl} v_{kl} = \min \quad (6)$$

Деформацию оценивали как:

$$\varepsilon_{kl} = \beta(T_{kl-1} - T_{kl} - \Delta T_l) + \varepsilon_{okl-1} \quad (7)$$

k - номер интервала сеточной области;

l - номер интервала расчета по времени

T_{kl} - температурный интервал с индексами kl ;

T_{kl-1} - температура интервала с индексами $kl-1$, то есть, в предыдущий момент времени расчета;

m_{kl} - модуль упругости k -го интервала;

v_{kl} - объем k -го интервала;

ε_{okl-1} - остаточная деформация от расчета в предыдущий момент времени (в начальный момент она принята равной нулю);

ΔT_l - величина, значение которой определяется из условия минимума A .

Деформация ε_{kl} умноженная на модуль упругости m_k (его расчет приведен выше) - есть напряжение. Поэтому под знаком суммы действительно работа деформации.

Определим ΔT_l , дифференцируя A по ΔT_l и, приравнявая производную к нулю:

$$\frac{\partial A}{\partial \Delta T_l} = -2\beta \sum_{k=1}^n [\beta(T_{kl-1} - T_{kl} - \Delta T_l) + \varepsilon_{okl-1}] m_k v_k = 0 \quad (8)$$

Обозначим

$$c = \sum_{k=1}^n [\beta(T_{kl-1} - T_{kl}) + \varepsilon_{okl-1}] m_k v_k \quad (9)$$

$$d = \sum_{k=1}^n \beta m_k v_k \quad (10)$$

$$\text{Тогда из } \sum_{k=1}^n [\beta(T_{kl-1} - T_{kl} - \Delta T_l) + \varepsilon_{okl-1}] m_k v_k = c - d\Delta T_{cprl} = 0, \text{ получим} \quad (11)$$

$$\Delta T_{cprl} = \frac{c}{d} = \left\{ \sum_{k=1}^n [\beta(T_{kl-1} - T_{kl}) + \varepsilon_{okl-1}] m_k v_k \right\} / \sum_{k=1}^n \beta m_k v_k \quad (12)$$

Из этой формулы следует, что если $T_{kl} \rightarrow T_k$, то $T_{kl-1} - T_{kl} \rightarrow 0$, то $\Delta T_{cprl} \rightarrow \frac{\varepsilon_{ok}}{\beta}$

Оценим значение принимаемой работы деформации, согласно полученной формуле для ΔT_{cprl}

$$A = \sum_{k=1}^n [\beta(T_{kl-1} - T_{kl} - c/d) + \varepsilon_{okl-1}]^2 m_{kl} v_{kl} = A_1 + A_2 + A_3, \text{ где}$$

$$A_1 = \sum_{k=1}^n [\beta(T_{kl-1} - T_{kl}) + \varepsilon_{okl-1}]^2 m_{kl} v_{kl}$$

$$A_2 = \sum_{k=1}^n [\beta(-c/d)]^2 m_{kl} v_{kl} = \beta \frac{c^2}{d^2} \sum_{k=1}^n m_{kl} v_{kl} = \beta \frac{c^2}{d}$$

$$A_3 = -2\beta c/d \sum_{k=1}^n [\beta(T_{kl-1} - T_{kl}) + \varepsilon_{okl-1}] m_{kl} v_{kl}$$

$$A_3 = -2\beta/d \left\{ \sum_{k=1}^n [\beta(T_{kl-1} - T_{kl}) + \varepsilon_{okl-1}] m_{kl} v_{kl} \right\}^2 = -2\beta \frac{c^2}{d}$$

$$A = A_1 - \beta \frac{c^2}{d}$$

То есть, при $T_{kl-1} - T_{kl} \rightarrow 0$ работа деформации соответствует

$$A = A_1 - \beta \frac{c^2}{d} \quad A_1 = \sum_{k=1}^n [\varepsilon_{ok}]^2 m_k v_k - \beta \left\{ \sum_{k=1}^n [\varepsilon_{ok}] m_k v_k \right\}^2 / \sum_{k=1}^n \beta m_k v_k = 0 \quad (13)$$

Иногда дискутируется вопрос, сохраняется ли равновесие системы при разгрузке. Это можно объяснить тем, что если и есть небольшая неравновесность, то она связана с зонами локальной пластической деформации, которых в рассматриваемой технологии немного.

Определив ΔT_l , рассчитывали деформацию на этапе l (она уже приведена выше)

$$\varepsilon_{kl} = \beta(T_{kl-1} - T_{kl} - \Delta T_l) + \varepsilon_{okl-1}.$$

Обозначим через $\varepsilon_{0.2}$ предельно упругую деформацию. Тогда, остаточная деформация после этапа расчета l , исходя из описания жестко пластической разгрузки, равна:

$$\varepsilon_{kl}, \text{ если } |\varepsilon_{kl}| \leq \varepsilon_{0.2}$$

$$\varepsilon_{okl} = \varepsilon_{kl} / |\varepsilon_{kl}| \cdot \varepsilon_{0.2}, \text{ если } |\varepsilon_{kl}| > \varepsilon_{0.2}$$

Соответственно, остаточное напряжение будет равно:

$$\sigma_{okl} = \varepsilon_{okl} m_k \quad (14)$$

Структурную деформацию учитывали в случае, когда температура $T_{kl} \leq T_{s_1}$, а $T_{kl-1} \geq T_{s_1}$,

где T_{s_1} - температура конца структурных превращений.

В этом случае

$$\varepsilon_{okl} = \varepsilon_{okl} + \varepsilon_{0.2}$$

Приведенный выше расчет подробно описан для тангенциальной деформации.

Для радиальной - знаки будут обратными.

Выводы. В результате выполненной работы разработана методика расчета термических деформаций и температурных напряжений возникающих во время кристаллизации в прокатных валках с гладкой бочкой. Данная методика дает возможность при расчетах учитывать объемность задачи и возникновение пластических деформаций от неравномерности распределения при кристаллизации температур и структурных превращений. Полученные расчетные формулы позволяют определить развитие термических деформации и температурных напряжений в отливках прокатных валков во время кристаллизации. Разработанную методику целесообразно использовать при расчете новых технологических процессов и параметров литья, для минимизации остаточных термических деформаций и температурных напряжений, которые

одночасно змогут забезпечити економію енергоресурсов, виключити застосування високотратної технології термічної обробки.

Список литературы.

1. Производство и применение прокатных валков: Справочник./ Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, Н.М. Александрова и др. Под ред. Проф. Т.С. Скобло-Х.: ЦД №1.2013-572с.
2. Вафин Р.К. Прочность термообрабатываемых прокатных валков/ Р.К.Вафин, А.М.Покровский, В.Г. Лешковцев // М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 264 с.
3. Коробейник В.В. Снижение остаточных напряжений при отжиге чугуновых валков/ В.В. Коробейник, С. И. Рудюк, В.И. Вакула и др. // Литейное производство, 1979, № 9, с. 4-6.
4. Моделирование структурного состояния и напряжений в прокатных валках при индукционной закалке / Бочектуева Е.Б. [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 9. С. 40-43.
5. Бочектуева Е.Б. Расчет температурно – структурного и напряженного состояний при термической обработке прокатных валков // Современная техника и технологии: Сб. трудов XVI международной научно – практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 2010. Том 1. С. 303 – 304.
6. Покровский А.М. Математическое моделирование температурноструктурного и напряженного состояния при закалке композитных прокатных валков / А.М. Покровский, В.Г. Лешковцев [и др.] // Сталь. - 2006 - №2. - С.60 - 63.
7. Анализ температурных полей отливок прокатных валков при кристаллизации / [Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Бурцев С.А., Сидашенко А.И.] // Промышленность. Focus Plus. [Ежемесячн. промышл. журнал]. - 2012.-№8.- С.36-44.
8. Скобло Т.С. Оценка напряжений и деформаций в прокатных валках при их кристаллизации / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Бурцев С.А., Власовец В.М., Попов С.Н., Погорелов В.Я., Соколов Р.Г. // Ресурсозберігаючі технології матеріалів та обладнання у ремонтному виробництві: Вісник ХНТУСГ, вип. 96 – Харків. 2010. – С.297-309.
9. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. Расчеты методом расчленения тела/В.В. Абрамов.- М.: Машгиз, 1963.-356с.

Рецензенты: заместитель генерального директора ГП «УКРНТЦ «ЭНЕРГОСТАЛЬ», к.т.н. Рудюк А.С., профессор кафедры технологические системы ремонтного производства д.т.н., проф. Власовец В.М..

Стаття надійшла до редакції 25.04.2016.