

## ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74

Зарицкий Б.Б., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Тютеряков Н.Ш., Постникова А.С.

## ФОРМИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ИЗГИБА В БОЧКЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОКАТНОГО ВАЛКА ПРИ ЕГО ТЕРМООБРАБОТКЕ

**Аннотация.** В статье рассматривается частный случай напряженного состояния тела двуслойного прокатного валка при термообработке. Для решения этой проблемы предлагается использовать математический аппарат, позволяющий определять напряженное состояние по сечению валка при изгибе. На основе полученных данных делаем вывод, что уменьшение стенки бандажа валка приводит к росту напряженного состояния в периферийных слоях вала и на границы свариваемости. На основе анализа построенных зависимостей видно, что изменение механических свойств материалов рабочего слоя и сердцевины значительным образом сказывается на разности как нормальных, так и касательных напряжений на границе свариваемости рабочей слой – сердцевина.

**Ключевые слова:** прокатный валок, математическая модель, напряженное состояние, модуль упругости, касательные и нормальные напряжения.

## Введение

При изготовлении прокатных валков разнородной упругости (состоящих из различных материалов – рабочего слоя и центральной части валка) достаточно остро стоит вопрос о получении здорового тела изделия в процессе его термообработки [1]. Следует отметить, что зачастую нарушение сплошности тела валка происходит по границе сопряжения рабочего слоя с материалом сердцевины, это связано с возникающими термическими, фазовыми напряжениями, а также напряжениями от изгиба возникающего при двух- или четырехточечном креплении валка при его термообработке [2]. Рассмотрим вопрос о возникновении напряженного состояния по сечению валка вследствие деформаций изгиба.

## Теоретическая часть

При расчете на изгиб бруса разнородной упругости все его геометрические характеристики приводятся к одному материалу [3]. При вычислении геометрических характеристик величина площади поперечного сечения, принадлежащей каждому материалу, умножается на коэффициент, равный отношению модуля упругости данного материала к модулю упругости приводимого материала (обычно того площадь, которого больше) [4].

Таким образом, выражения геометрических характеристик будут иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{\text{пр}} = \int_A \frac{E}{E_0} dA \\ S_{\text{пр}} = \int_A y \frac{E}{E_0} dA \\ I_{\text{пр}} = \int_A y^2 \frac{E}{E_0} dA \end{array} \right\},$$

где  $A_{\text{пр}}$ ,  $S_{\text{пр}}$ ,  $I_{\text{пр}}$  – геометрические характеристики приведенного сечения – площадь, статический момент, момент инерции соответственно;

$E$ ,  $E_0$  – модули продольной упругости соответствующей элементарной площадки  $dA$  и приводимого материала соответственно.

В работе будем рассматривать два жестко сопряженных элемента круглого и кольцевого сечения из различных материалов  $j$ ,  $i$  (рис. 1).

Определим центр тяжести приведенного сечения по формуле [5, с. 9]

$$a = \frac{S_z^{\text{пр}}}{A_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где  $A_{\text{пр}}$  – приведенная площадь сечения, см<sup>2</sup>;

$S_z^{\text{пр}}$  – статический момент приведенного сечения, см<sup>3</sup>.

Статический момент приведенного сечения [5]

$$S_z^{\text{пр}} = A_i a_i + A_j a_j \frac{E_i}{E_j}, \quad (2)$$

где  $A_i$ ,  $A_j$  – площади  $i$ -го и  $j$ -го материала, см<sup>2</sup>;

$a_i$ ,  $a_j$  – расстояния от оси  $z$  до центра тяжести фигур из материалов  $i$ ,  $j$ , см;

$E_i$ ,  $E_j$  – модули продольной упругости материалов  $i$ ,  $j$ , МПа.

Приведенную площадь сечения [5, с. 9]

$$A_{\text{пр}} = \pi \left( r_j^2 + r_i^2 \left[ \frac{E_i}{E_j} - 1 \right] \right), \quad (3)$$

где  $r_i$ ,  $r_j$  – радиусы элементов из  $i$ -го и  $j$ -го материала, см.

Через найденное расстояние  $a$  проведем нейтральную ось  $x$  (см. рис. 1).

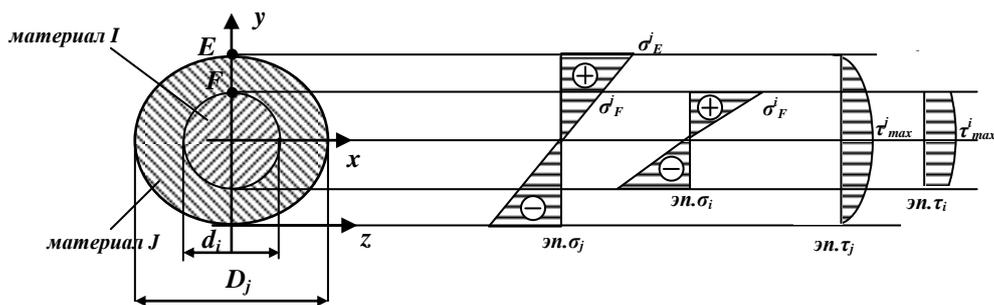


Рис. 1. Схема напряженного состояния биметаллического вала при изгибе

Определим приведенный осевой момент инерции относительно нейтральной оси  $x$  [5] как

$$I_x^{np} = I_x^i + I_x^j \frac{E_i}{E_j}, \quad (4)$$

где  $I_x^{np}$  – приведенный осевой момент инерции относительно нейтральной оси  $x$ ,  $\text{см}^4$ ;  
 $I_x^i, I_x^j$  – моменты инерции сечений из материалов  $i, j$ ,  $\text{см}^4$ .

$$I_x^i = \frac{\pi d_i^4}{64}; \quad (5)$$

$$I_x^j = \frac{\pi d_j^4}{64} \left[ 1 - \left( \frac{d_i}{d_j} \right)^4 \right]. \quad (6)$$

Возникающие на стыке материалов  $i$  и  $j$  нормальные напряжения в т.  $F$ , а также максимальные нормальные в т.  $E$  и касательные (рис. 1) определим по формулам:

$$\sigma_E^j = \frac{M}{I_x^{np}} r_j; \quad (7)$$

$$\sigma_F^j = \frac{M}{I_x^{np}} r_i; \quad (8)$$

$$\sigma_F^i = \frac{E_i}{E_j} \frac{M}{I_x^{np}} r_i. \quad (9)$$

Для определения касательных напряжений найдем приведенный статический момент [5]:

$$S_{np} = \sum A_j y_c^j + \sum A_i y_c^i \frac{E_i}{E_j}, \quad (10)$$

где  $y_c^i, y_c^j$  – расстояние от нейтральной оси  $x$  до центра тяжести фигур из материалов  $i, j$ ,  $\text{см}$ .

Для полукольца и полукруга  $y_c^i, y_c^j$  определяются как

$$y_c^i = \frac{4r_i}{3\pi}; \quad (11)$$

$$y_c^j = \frac{4(r_j^2 + r_j r_i + r_i^2)}{3\pi(r_j + r_i)}. \quad (12)$$

Тогда, используя уравнение Журавского [5], максимальные касательные напряжения определим как

$$\tau_j^{\max} = \frac{QS_{np}}{I_x^{np} D_{np}}; \quad (13)$$

$$\tau_i^{\max} = \frac{QS_{np}}{I_x^{np} D_{np}} \frac{E_i}{E_j}, \quad (14)$$

где  $D_{np}$  – длина волокна сечения, по которому определяются касательные напряжения,  $\text{см}$ ,

$$D_{np} = D_j + D_i \left( \frac{E_i}{E_j} - 1 \right). \quad (15)$$

### Практическая часть

Применим выражения (7-9), (13), (14) для расчета напряженного состояния бочки двуслойного прокатного вала диаметром 820 мм и длиной 2200 мм, толщина стенки бондажа 50 мм, при двухконтактной опоре вала в процессе его термообработки. При весе бочки вала 221 кН максимальный момент, возникающий в сечении, будет равен 6077,5 кНсм, максимальное поперечное усилие 110,5 кН. Определим возникающее напряженное состояние в характерных точках  $E, A$  (см. рис. 1) при изгибе вала. Рассмотрим изменения происходящие при изменении соотношения диаметров рабочего слоя вала и основного материала рис. 2. При расчете зависимостей (рис. 2, а, б) модуль продольной упругости принимался для материала  $j - 2 \cdot 10^5$  МПа,  $i - 1,8 \cdot 10^5$  МПа. При расчете зависимостей (рис. 2, в, г) диаметры принимались равными  $D_j = 820$  мм,  $d_i = 720$  мм.

Как видно из рис. 2, а уменьшение стенки бондажа (материал  $j$ ) приводит к росту напряженного состояния в исследуемых характерных точках  $E, F$ . Это связано прежде всего с разными механическими характеристиками двух материалов, выраженных в данном случае модулями продольной упругости. Максимальные нормальные напряжения возникают в

т.  $E$ , что согласуется с уравнением Навье, определяющим распределение нормальных напряжений при изгибе стержня. Вместе с тем следует отметить, что с уменьшением толщины стенки бондажа растет разность напряжений на границе двух материалов (рис. 3, а) и как следствие, увеличивается вероятность наруше-

ния сплошности вала в процессе его термообработки по границе свариваемости, зачастую имеющую более низкие прочностные характеристики, нежели механические свойства свариваемых материалов. Аналогичную картину мы видим при исследовании максимальных касательных напряжений (см. рис. 2, б.)

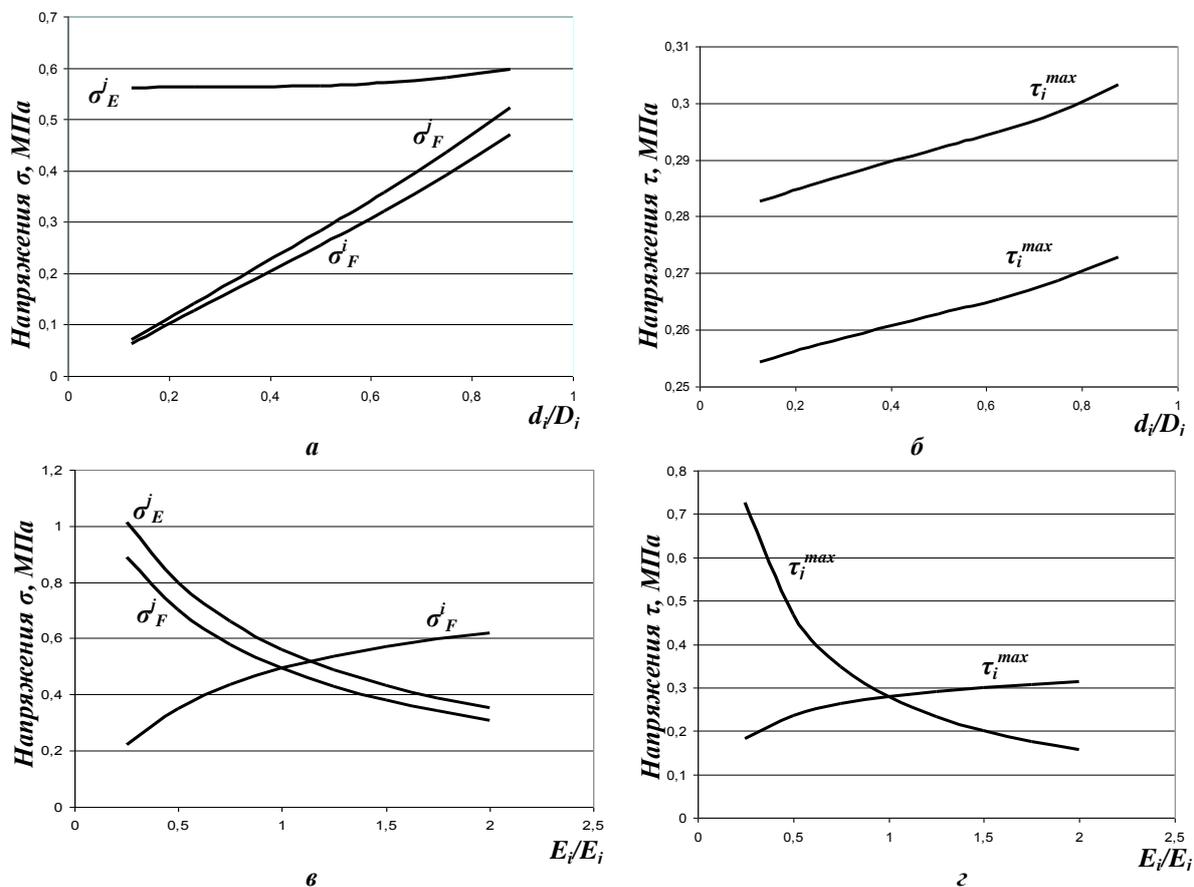


Рис. 2. Изменение напряжений в точках  $E, F$  в зависимости от соотношения диаметров (а, б) и модулей упругости (в, г) бондажа и основного слоя прокатного вала

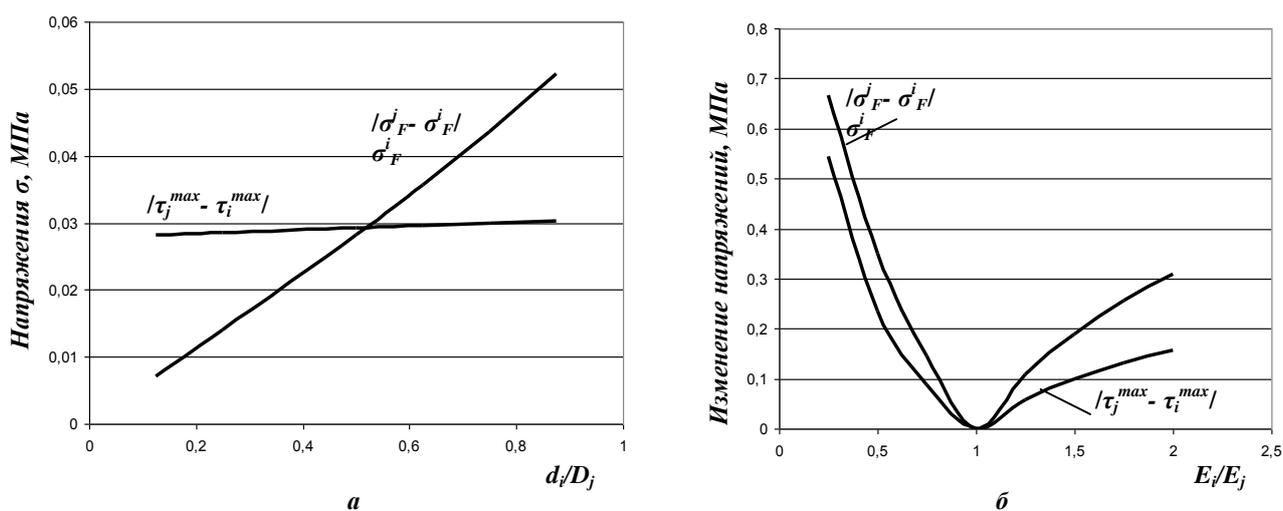


Рис. 3. Абсолютное изменение напряжений на границе материалов в зависимости от соотношения диаметров (а), и модулей упругости (б) бондажа и основного слоя прокатного вала

Рост касательных напряжений при увеличении внутреннего диаметра бондажа также связан с различными модулями продольной упругости свариваемых материалов, однако разность касательных напряжений двух материалов в точке сопряжения, практически постоянна (см. рис. 3, а).

Влияние материалов рабочего слоя и основы на возникающие напряжения выразили через соотношение модулей упругости  $E_i/E_j$ . Полученное решение представлено на рис. 2, в, г. Как видно из графика, изменение механических свойств материала значительным образом сказывается на разности как нормальных (см. рис. 2, в), так и касательных (см. рис. 2, г) напряжений на границе свариваемости рабочий слой – сердцевина. Это особенно хорошо заметно на рис. 3, б, где показана разность по модулю напряжений рабочего и основного слоя, взятая в точке свариваемости  $F$ . Как следствие, исходя из графиков, видно, что значительное изменение свойств материала приводит к росту абсолютных отклонений как касательных, так и нормальных напряжений, что в соответствии с законом Гука говорит о значительном различии возникающих деформаций, а следовательно, чем больше отклонение в модулях продольной упругости материала бондажа и основы, тем больше вероятность расслоения по границе свариваемости.

#### Выводы

Таким образом, в результате проведенной работы адаптирован математический аппарат, обеспечивающий определение напряженного состояния по сечению двухслойного прокатного валка при изгибе.

Выявлено, что уменьшение стенки рабочего слоя прокатного валка приводит к росту напряженного состояния как по сечению, так и на границе свариваемости бондажа и сердцевины при изгибе в процессе термообработки изделия.

#### Сведения об авторах

**Зарицкий Борис Борисович** – старший преподаватель кафедры «Механика», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: zaritskii.boris.borisovich@yandex.ru.

**Савинов Александр Сергеевич** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Механика», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: savinov\_nis@mail.ru.

**Феоктистов Николай Александрович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Литейные процессы и материаловедение», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: fna87@mail.ru.

**Тютеряков Наиль Шаукатович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «ПиЭММО», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: n.tutyeryakov@magtu.ru.

**Постникова Алена Сергеевна** – старший преподаватель кафедры «Механика», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: a.tuboltseva@magtu.ru.

Установлено, что чем больше отклонение в значениях модуля продольной упругости материалов рабочего слоя и основы, тем больше возникающие напряжения по границе свариваемости материалов, а так же по сечению в целом.

#### Список литературы

1. Савинов А.С., Тубольцева А.С. Расчет напряжений в углеродистых сталях при высоких температурах // Современные технологии в машиностроении: материалы XV Международной научно-технической конференции. Пенза: Приволжский дом знаний, 2011. С. 38–40.
2. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Зарицкий Б.Б. Прогнозирование напряжений в толстостенных отливках при деформациях в температурном интервале хрупкости // Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 10 томах. 2015. С. 128–130.
3. Савинов А.С., Зарицкий Б.Б. Прогнозирование механических свойств стали // Итоги научных исследований: сборник статей Международной научно-практической конференции. 2015. С. 22–26.
4. Третьяков А.В., Трофимов Г.К., Гурьянова Н.К. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании. М.: Машиностроение, 1971. 63 с.
5. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов : учебное пособие. 17-е изд. М.: МГТУ им. Баумана, 2018. 542 с. Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/106484> (дата обращения: 10.11.2020). Режим доступа: для авториз. пользователей.

**FORMATION OF BENDING STRESSES IN THE BARREL OF BIMETALLIC ROLLING ROLLS DURING THEIR HEAT TREATMENT**

**Zaritskii Boris B.** – Senior Lecturer of department «Mechanics», Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: zaritskii.boris.borisovich@yandex.ru.

**Savinov Alexander S.** – Doctor of Technical Sciences, head of department «Mechanics», Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: savinov\_nis@mail.ru.

**Feoktistov Nikolay A.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of department «Foundry Processes and Material Science», Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fna87@mail.ru.

**Tyuteryakov Nail Sh.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of department of Design and operation of metallurgical machinery and equipment («PiEMMO»), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: n.tyuteryakov@magtu.ru.

**Postnikova Alyona S.** – Senior Lecturer of department «Mechanics», Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: a.tuboltseva@magtu.ru.

**Abstract.** The article deals with a particular case of stressed state of a body of a bimetallic rolling roll during heat treatment. To solve this problem, it is proposed to use a mathematical apparatus, which allows to determine the stress state of the roll cross-section during bending. Based on the data obtained, we conclude that the reduction of the roll band wall leads to an increase in the stress state in the peripheral layers of the roll and at the boundary of weldability. Based on the analysis of the dependencies, it is seen that the change in the mechanical properties of the working layer and the core materials significantly affects the difference between both the normal and shear stresses on the boundary of weldability of the working layer - the core.

**Keywords:** rolling roll, mathematical model, stress state, modulus of elasticity, tangential and normal stresses.

---

Ссылка на статью:

Формирование напряжений изгиба в бочке биметаллического прокатного валка при его термообработке / Зарицкий Б.Б., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Тютеряков Н.Ш., Постникова А.С. // Теория и технология металлургического производства. 2021. №3(38). С. 30-34.  
Zaritskii B.B., Savinov A.S., Feoktistov N.A., Tyuteryakov N.Sh., Postnikova A.S. Formation of bending stresses in the barrel of bimetallic rolling rolls during their heat treatment. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 38, no. 3, pp. 30-34.