



<https://energosteel.com/metal-treatment-type-the-rolling>

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

При изготовлении прокатных валков разнородной упругости (состоящих из различных материалов рабочего слоя и центральной части валка) достаточно остро стоит вопрос получения 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 с 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.

При расчете на изгиб бруса разнородной упругости все его геометрические характеристики приводятся к одному мате-

риалу [3]. При вычислении геометрических характеристик величина площади поперечного сечения, принадлежащей каждому материалу, умножается на коэффициент, равный соотношению модуля упругости данного материала и модуля упругости приводимого материала (обычно того, площадь которого больше) [4].

Таким образом, выражения геометрических характеристик будут иметь вид:

$$\left\{ \begin{aligned} A_{np} &= \int_A \frac{E}{E_0} dA \\ S_{np} &= \int_A y \frac{E}{E_0} dA \\ I_{np} &= \int_A y^2 \frac{E}{E_0} dA \end{aligned} \right\},$$

где  $A_{np}$ ,  $S_{np}$ ,  $I_{np}$  – геометрические характеристики приведенного сечения: пло-

щадь, статический момент, момент инерции соответственно;

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

В работе мы 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]

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

где  $A_{np}$  – приведенная площадь сечения,  $см^2$ ;

$S_z^{np}$  – статический момент приведенного сечения,  $см^3$ .

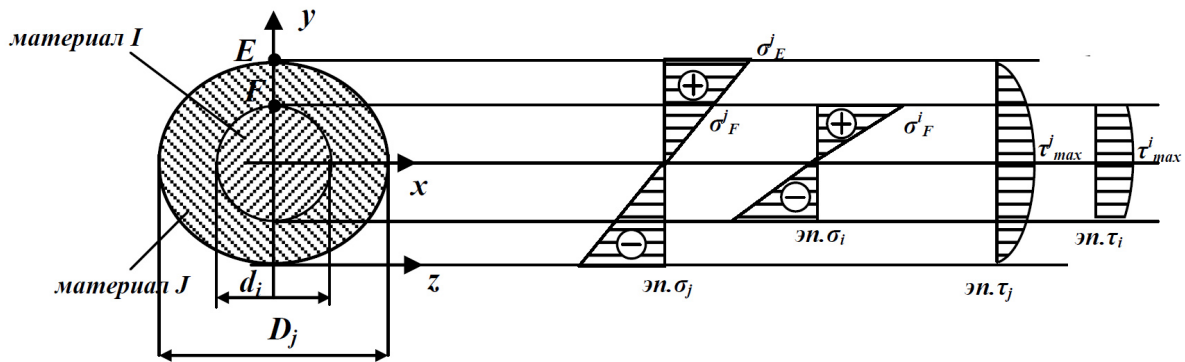


Рис. 1. Схема напряженного состояния биметаллического вала при изгибе

Статический момент приведенного сечения определяется как [5]

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

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 определим как [5]

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

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

Через найденное расстояние  $a$  проведем нейтральную ось  $x$ .

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

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

где  $I_x^{np}$  – приведенный осевой момент инерции относительно нейтральной оси  $x$ , см<sup>4</sup>;

$I_x^i, I_x^j$  – моменты инерции сечений из материалов  $i, j$ , см<sup>4</sup>.

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

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

Возникающие на стыке материалов  $i$  и  $j$  нормальные напряжения в точке  $F$ , а также максимальные нормальные в точке  $E$  и касательные (см. 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  $i, j$ , см.

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

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

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

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, см.

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

Применим выражения 7-9, 13, 14 для расчета напряженного состояния бочки двуслойного прокатного вала диаметром 820 мм и длиной 2200 мм, толщина стенки бандажа 50 мм, при двухконтактной опоре вала в процессе его термообработки. При весе бочки вала 221кН 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 (см. рис. 2а, б) модуль продольной упругости принимался для материала  $j - 2 \cdot 10^5$  МПа,  $i - 1,8 \cdot 10^5$  МПа. При расчете зависимостей (см. рис. 2в, г) диаметры принимались равными  $D_j = 820$  мм,  $d_i = 720$  мм. Как видно из рис. 2, уменьшение стенки бандажа (материал  $j$ ) приводит к росту

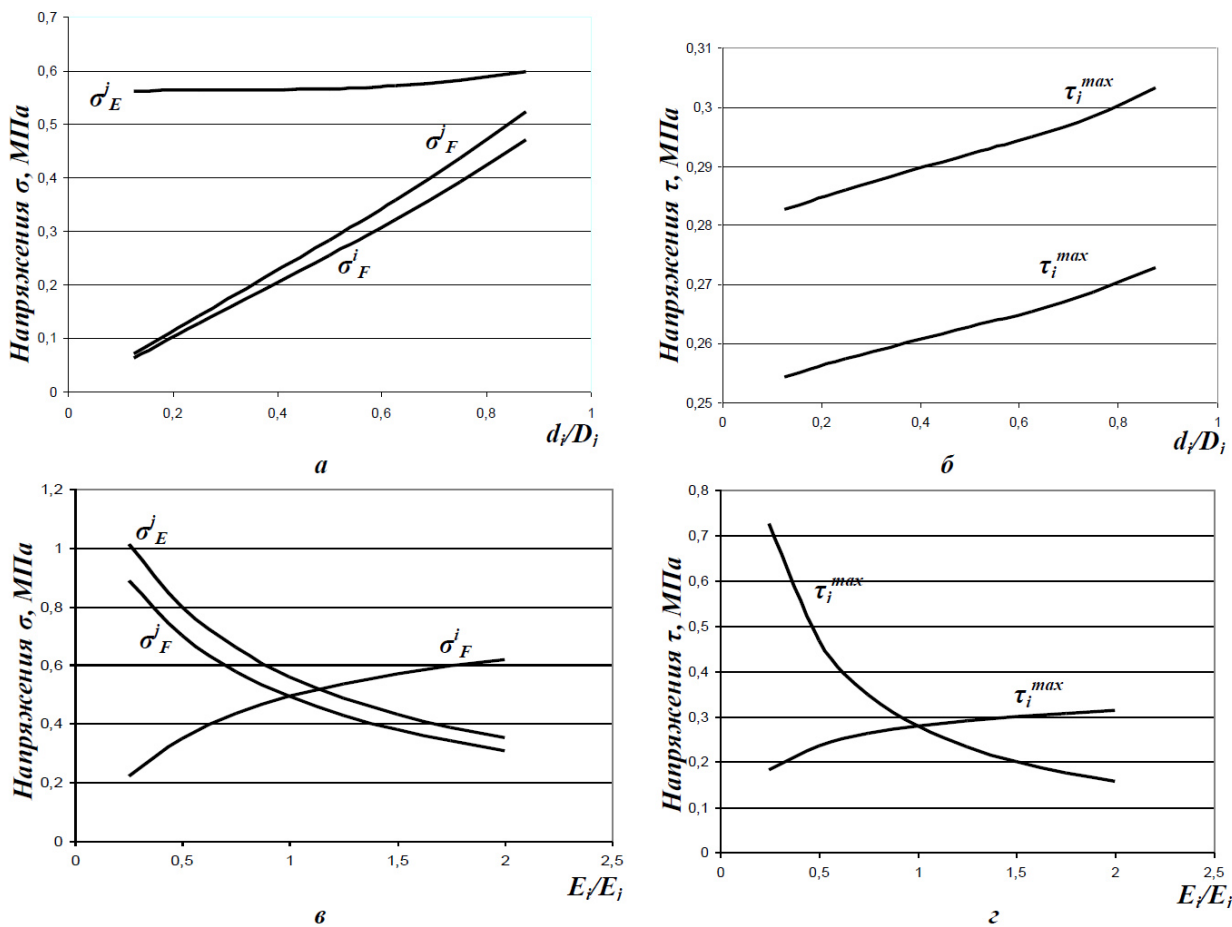


Рис. 2. Изменение напряжений в точках  $E, F$  в зависимости от соотношения диаметров (а, б) и модулей упругости (в, г) бандажа и основного слоя прокатного вала

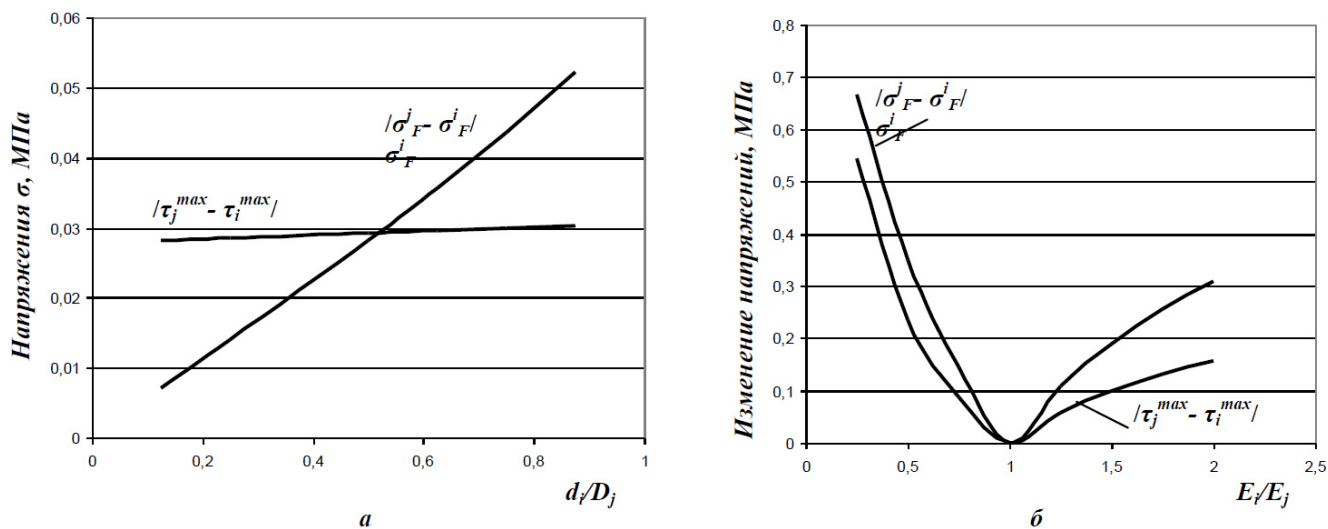


Рис. 3. Абсолютное изменение напряжений на границе материалов в зависимости от соотношения диаметров (а) и модулей упругости (б) бандажа и основного слоя прокатного вала

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 точке  $E$ , что согласуется с уравнением Навье, определяющим распределение нормальных напряжений при изгибе стержня. Вместе с тем следует отметить, что с уменьшением толщины стенки банджа растет разность напряжений на границе двух материалов (рис. 3) и, как следствие, увеличивается вероятность нарушения сплошности вала в процессе его термообработки по границе свариваемости, зачастую имеющей более низкие прочностные характеристики по сравнению с механическими свойствами свариваемых материалов. Аналогичную картину мы видим при исследовании максимальных касательных напряжений (см. рис. 2б).

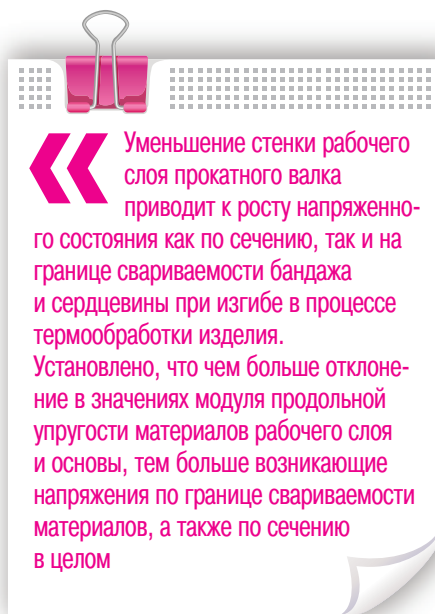
Рост касательных напряжений при увеличении внутреннего диаметра банджа также связан с различными модулями продольной упругости свариваемых материалов, однако разность касательных напряжений двух материалов в точке сопряжения практически постоянна (см. рис. 3а).

Влияние материалов рабочего слоя и основы на возникающие напряжения выразили через соотношение модулей упругости  $E_1/E_2$ . Полученное решение представлено на рис. 2в, г. Как видно из графика, изменение механических свойств материала значительным образом сказывается на разности как нормальных (рис. 2), так и касательных (рис. 2е) напряжений на границе свариваемости "рабочий слой – сердцевина". Это особенно хорошо заметно на рис. 3б, где показана разность по модулю напряжений рабочего и основного слоя, взятая в точке свариваемости  $F$ . 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. Следовательно, чем больше отклонение в модулях продольной упругости материала банджа и основы, тем выше вероятность расслоения по границе свариваемости.

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

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

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



#### Литература

1. Савинов А.С., Тубольцева А.С. Расчет напряжений в углеродистых сталях при высоких температурах / Современные технологии в машиностроении: сборник XV Международной научно-технической конференции. — Пенза: Приволжский дом знаний, 2011. С. 38–40.
2. Савинов А.С., Прогнозирование напряжений в толстостенных отливках при деформациях в температурном интервале хрупкости / Савинов А.С., Тубольцева А.С., Зарицкий Б.Б. / В сборнике: 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. Прогнозирование механических свойств стали / Савинов А.С., Зарицкий Б.Б. / В сборнике: 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. Н.Э. Баумана, 2018. — 542 с. — ISBN 978-5-7038-4819-7. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/106484> (дата обращения: 10.11.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

*Борис Зарицкий,  
старший преподаватель  
кафедры "Механика"*

*Александр Савинов,  
д.т.н., заведующий кафедрой  
"Механика"*

*Николай Феоктистов,  
к.т.н., заведующий кафедрой  
"Литейные процессы  
и материаловедение"*

*Наиль Тютряков,  
к.т.н., доцент кафедры "ПиЭММО"*

*Алена Постникова,  
старший преподаватель  
кафедры "Механика"*

*ФГБОУ ВО "МГТУ им. Г.И. Носова"  
г. Магнитогорск*

*E-mail: zaritskii.boris.borisovich@yandex.ru*

*Опубликовано: Теория и технология  
металлургического производства,  
№ 3'2021*