

УДК 539.38

## МЕТОД РАСЧЕТА И ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО РОЛИКА, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ТЕРМОУСТАЛОСТИ

В.В. Клипачевский<sup>1</sup>, А.И. Новиков<sup>2</sup>, Г.В. Цыбанёв<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Инженер, Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: [wolfandbear@ukr.net](mailto:wolfandbear@ukr.net)

<sup>2</sup>Кандидат технических наук, Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: [nova1983r@ukr.net](mailto:nova1983r@ukr.net)

<sup>3</sup>Доктор технических наук, Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: [g.v.tsybanov@ipp.kiev.ua](mailto:g.v.tsybanov@ipp.kiev.ua)

**Аннотация.** Рассмотрен случай влияния нанесения слоя металла на основной металл для эксплуатации в условиях термоусталости. Долговечность такого биметаллического композита определяется напряженно-деформированным состоянием (НДС) поверхностных слоев. В исследовании показано влияние соотношений коэффициентов линейного расширения и теплопроводности, а также механических свойств поверхностных слоев и основного металла роликов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) на поля напряжений вблизи контакта ролика со слябом. Обоснованный выбор этих параметров позволяет увеличить время эксплуатации роликов МЛНЗ

*Ключевые слова:* биметаллический композит, термоупругость, НДС, модель.

## CALCULATING METHOD AND MEANS OF OPTIMIZING THE PARAMETERS OF BIMETALLIC ROLLER OPERATING UNDER THERMAL FATIGUE CONDITIONS

V.V. Klipachevsky<sup>1</sup>, A.I. Novikov<sup>2</sup>, G.V. Tsyban'ov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Engineer, G.S. Pisarenko Institute of Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: [wolfandbear@ukr.net](mailto:wolfandbear@ukr.net)

<sup>2</sup>PhD, G.S. Pisarenko Institute of Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: [nova1983r@ukr.net](mailto:nova1983r@ukr.net)

<sup>3</sup>Dr., PhD, G.S. Pisarenko Institute of Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: [g.v.tsybanov@ipp.kiev.ua](mailto:g.v.tsybanov@ipp.kiev.ua)

**Abstract.** This paper considers the case for the influence of applying a layer of metal on the base metal for the operation under thermal fatigue conditions. The lifetime of this bimetallic composite is determined by the stress-strain state of the surface layers. The study shows the influence of the linear expansion and heat conduction coefficient ratios, as well as the mechanical properties of the surface layers of the bimetallic composite metals and base metal of slab continuous casting machine (SCCM) rollers on the stress field formation near the roller-to-slab contact. A reasonable choice of these parameters allows an increase in the operating time of SCCM rollers.

*Keywords:* bimetallic composite, thermoelasticity, stress-strain state (SSS), model.



**Введение.** При эксплуатации машин и оборудования, подвергнутых различному термосиловому воздействию в различных средах, процесс разрушения ответственных элементов часто связан с деградацией свойств поверхностных слоев материала. В этой связи повышение долговечности многих элементов конструкций может быть достигнуто путем модификации поверхностного слоя материала с учетом условий его эксплуатации. Свойства поверхностного слоя материала формируются при изготовлении деталей и далее изменяются в соответствии с последующей обработкой и эксплуатацией.

Физическое состояние поверхностного слоя детали является следствием упругопластических деформаций и местного нагрева, возникающих в зоне резания, а также тепловых и химико-термических обработок. Кроме того, в силу наличия свободной поверхности в условиях однородного напряженного состояния пластическое течение поверхностных слоев начинается раньше, чем сердцевинных, из-за различия значений условного предела текучести поверхностных и внутренних слоев материала [1, 2, 3].

Пластическое деформирование поверхностного слоя, а также локальный высокотемпературный нагрев поверхности с последующим охлаждением приводят к инициированию остаточных напряжений, которые складываются с эксплуатационными. Так как при различных видах обработки деталей (механическая, термическая, сварка, нанесение металлических и неметаллических покрытий) факторы, которые влияют на формирование остаточных напряжений определенного знака (растяжения или сжатия) также отражаются на их ресурсе, одной из актуальных задач в повышении долговечности ответственных элементов конструкций является направленное формирование свойств их поверхностного слоя и оценка долговечности такого композита в условиях эксплуатации.

**Цель работы.** Показать один из способов модификации поверхностного слоя и его адаптации к условиям нагружения путем нанесения на основной металл покрытия или слоя другого металла.

**Основной материал.** В данном случае использования такого биметаллического композита (основной металл и материал верхнего слоя) комбинация их физико-механических свойств может формировать на поверхности детали остаточные напряжения того или другого знака и таким образом влиять на долговечность конструкции. Использование возможностей биметаллического композита влиять на напряженно-деформированное состояние поверхностных слоев деталей рассмотрено на примере одного из наиболее нагруженных элементов МНЛЗ – направляющем ролике. В условиях эксплуатации ролик удерживает перемещаю-

щийся слиток (сляб) на технологической оси МНЛЗ и подвергается циклическому нагреву с водяным охлаждением его свободной поверхности. Для повышения коррозионной стойкости на поверхность ролика наплавляют коррозионно-стойкий материал, который подбирают эмпирическим путем.

Так как эксплуатационные (термические и механические) нагрузки ролика обусловлены технологическим процессом, то формирование термических напряжений на его поверхности возможно путем изменения температурного поля по поперечному сечению и создания в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия с оптимальным перераспределением участков растяжения и сжатия в эпюре термических напряжений за счет отличий значений коэффициентов линейного расширения (КЛР), температуропроводности (КТП), теплопроводности (КТ), теплоемкости (КТЕ), плотности, модуля упругости, модуля сдвига и коэффициентов Пуассона основного металла и металла наплавки. Для оценки НДС ролика при эксплуатационных изменениях температуры его поверхности использован расчетный метод на основе конечно-элементной модели с варьированием физико-механических свойств поверхностного слоя относительно металла основы, который нанесен методом наплавки. Варьирование выбранных теплофизических коэффициентов осуществляли путем выбора соответствующих им сталей с изменяющимися от температуры характеристиками механических свойств, что учитывалось в расчетах. Далее показана методика расчета такого ролика с помощью разработанной модели.

**Физико-механические свойства теплостойких сталей при повышенных и высоких температурах.** В конструкциях различного назначения используются стали с разным уровнем механических (сопротивлению кратковременному и длительному статическому и циклическому деформированию и разрушению) и физическими (КЛР, КТП, КТ, КТЕ и др.) свойствами [4]. Эти свойства металлических материалов различным образом зависят от температуры. Для одних материалов с повышением температуры характерно повышение некоторых физических характеристик, для других наоборот – снижение их значений. Для некоторых материалов такие физические характеристики как КЛР и КТЕ в диапазоне температур 600 – 9000С претерпевают более сложные закономерности. В [4] приведены зависимости значений некоторых теплофизических коэффициентов, модуля Юнга и коэффициента Пуассона от температуры для наиболее используемых в инженерной практике теплоустойчивых сталей в диапазоне температур, охватывающих условия реального температурного цикла. В качестве такого цикла принят температурный диапазон наиболее резкого изменения температуры на поверхности ролика МНЛЗ при его контакте со слябом.

**Расчетная оценка влияния физико-механических свойств материалов биметаллического композита на НДС ролика МНЛЗ.** В данном разделе проведена оценка влияния значений КЛР, КТ и толщины наплавленных слоев на НДС ролика в условиях реального температурного цикла. Для расчетов выбраны конструкционные стали, применяемые в подобных условиях эксплуатации. Расчет НДС ролика выполнен на основе конечно-элементной модели путем решения задачи теплопроводности с последующим решением задачи термоупругости. Далее приведены результаты оценки НДС ролика в упругой постановке только от воздействия температурного поля и без представления самих температурных полей. Влияние варьируемых физико-механических свойств поверхностного слоя и геометрических параметров роликов оценивали по величине напряжений в поверхностном слое наплавки вдоль его продольной оси.

На рис. 1 приведена схема ролика с двумя слоями наплавки и эпюры напряжений в части окружности ролика вблизи зоны контакта со слябом при варьировании физических и механических характеристик материалов наплавки. Для всех рисунков приняты обозначения:  $s_1$  – КТ основы;  $s_2$  – КТ слоя 1;  $s_3$  – КТ слоя 2;  $\alpha_1$  – КЛР основы;  $\alpha_2$  – КЛР слоя 1;  $\alpha_3$  – КЛР слоя 2. По оси абсцисс отложена часть окружности ролика в градусах.

В данном примере при равенстве физических характеристики материалов наплавки и основы принимается, что такой ролик - монолитный (на всех рисунках для монолитного ролика эпюры обозначены цифрой 1). На всех рисунках также максимальные сжимающие напряжения на эпюрах соответствуют вхождению ролика в контакт со слябом и максимальной температуре нагрева, а максимальные растягивающие напряжения соответствуют минимальной температуре охлаждения ролика перед вхождением в контакт со слябом. Оценка НДС показывает (см. рис. 1 и 2), что увеличение значений КЛР материала основы относительно наплавки в 2 раза (рис. 2, вариант 3), вызывает снижение напряжений сжатия более чем в 3 раза по сравнению с монолитным роликом, но при этом напряжения растяжения повышаются в  $\sim 2$  раза. Добавление еще одного слоя наплавки между основой и верхней наплавкой со средним значением КЛР между основой и наплавкой (рис. 1, варианты 3, 4) приводит к снижению растягивающих напряжений и незначительному повышению сжимающих напряжений. Таким образом, варьированием соотношений КЛР наплавки и основы можно существенно снизить сжимающие напряжения и размах напряжений, но при этом несколько увеличатся растягивающие напряжения. Промежуточный слой практически не влияет на величину размаха напряжений, но может влиять на асимметрию цикла. Исходя из этих расчетов, напряжения в верхнем слое ролика могут быть скорректированы в

пределах допустимых значений. Большое различие в значениях КЛР оказывает более существенное влияние на НДС ролика.

$\sigma_z$ , МПа

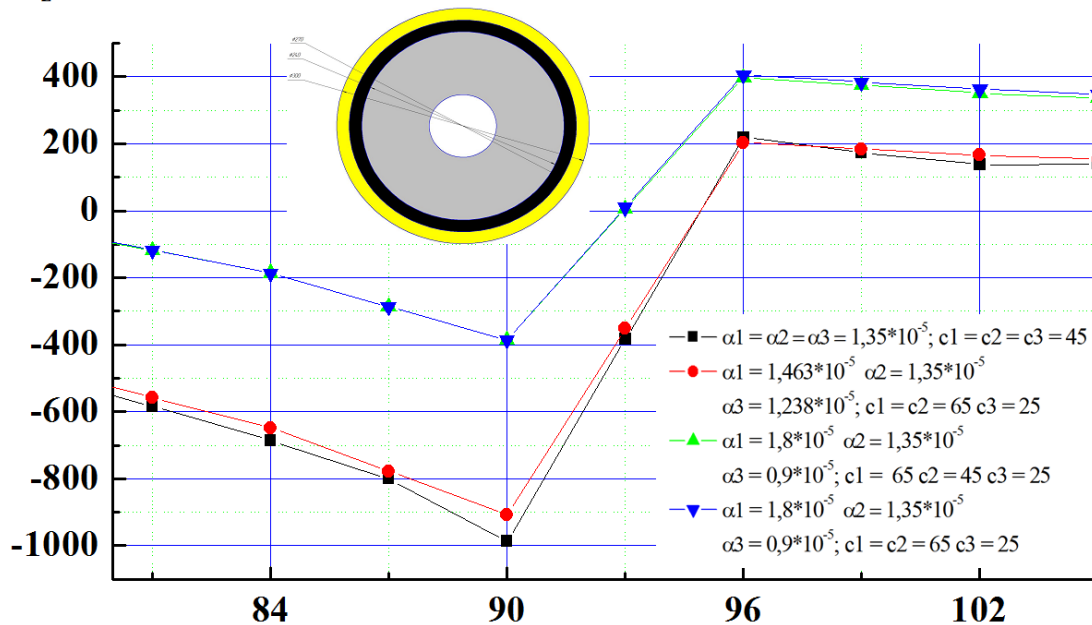


Рисунок 1 – Влияние теплофизических коэффициентов при двухслойной наплавке на формирование напряжений в ролике МНЛЗ (эпюры для 3-го и 4-го вариантов совпадают). Диаметр ролика внешний  $D = 300$  мм;  $d_1$ - диаметр основы ролика = 240 мм; Толщина слоя:  $t_1 = 15$  мм;  $t_2 = 15$  мм.

$\sigma_z$ , МПа

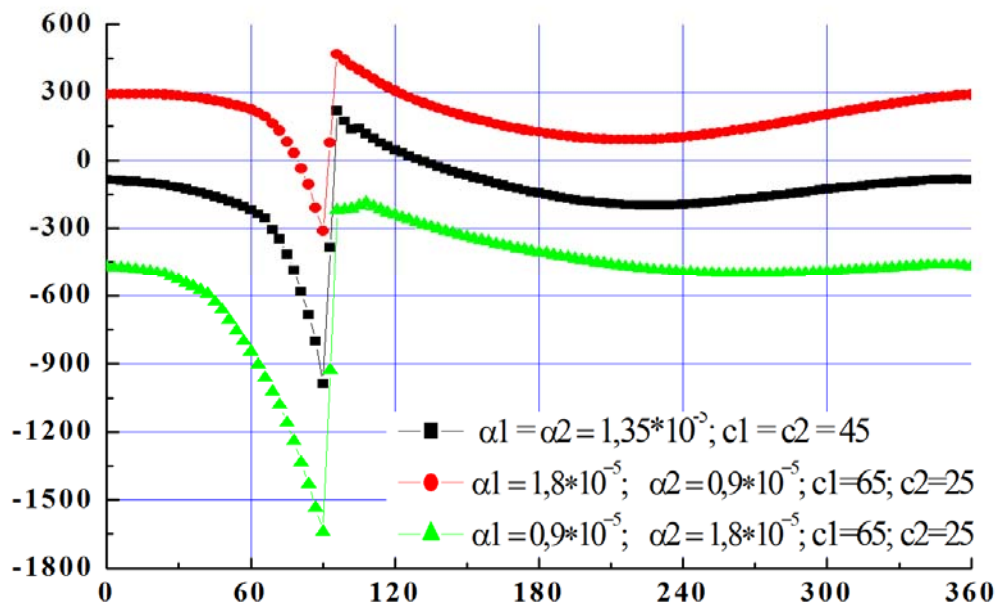


Рисунок 2 – Влияние соотношения КЛР основы и наплавки при однослойной наплавке на эпюры напряжений в ролике МНЛЗ. Диаметр ролика внешний  $D = 300$  мм;  $d_1$ - диаметр основы ролика = 270 мм; Толщина слоя:  $t_1 = 15$  мм.

Изменение соотношения КЛР материалов основы и наплавки в обратную сторону переводит эпюру напряжений полностью в область сжатия (рис. 2, вариант 3). При одинаковых значениях КТ материалов основы и наплавки при значениях КЛР основы меньших, чем материала наплавки значения напряжений сжатия в зоне начала контакта ролика со слябом в 1,5 раза выше, чем для монолитного ролика. При этом в зоне перед началом контакта ролика со слябом напряжения на поверхности ролика становятся сжимающими в отличие от монолитного ролика, для которого в этой зоне характерны напряжения растяжения.

Варьирование значений КТ материалов наплавки и основного металла для выбранных значений КЛР материалов наплавки и основного металла, не оказывает существенного влияния на НДС ролика (см. рис. 1, варианты 3, 4). Влияние соотношения КТ материалов основы и наплавки на НДС ролика показано на рис. 3. Повышение КТ материала основы относительно материала наплавки ведет к увеличению напряжений сжатия и незначительному снижению растягивающих напряжений по отношению к монолитному ролику (рис. 3, варианты 1, 4). На этом же рисунке приведены эпюры напряжений при варьировании КЛР материала основы при постоянных их значениях для материала наплавки. С повышением КЛР материалов основы при их постоянных значениях для материала наплавки величина напряжений сжатия падает (рис. 3, варианты 2, 3, 5).

Можно отметить, что при равных значениях КЛР материалов основы и наплавки при значениях КТ материалов наплавки ниже, чем материала основы, напряжения сжатия повышаются (рис. 4).

Сравнение влияния толщины верхнего слоя 15мм и 30мм на формирование поля напряжений в ролике МНЛЗ показывает, что верхний слой толщиной 15 мм дает более существенное снижение напряжений сжатия, чем при толщине наплавки 30 мм при одинаковых значениях КЛР и КТ (рис.5).

Из приведенных данных следует, что из рассмотренных физических коэффициентов наибольшее влияние на НДС ролика оказывает КЛР. При этом варьированием значениями КЛР основного материала и материала наплавки можно повышать или снижать эксплуатационные напряжения на поверхности ролика МНЛЗ.

В данной работе приведены результаты рассмотрения влияния только двух физических коэффициентов (КЛР и КТ) на НДС конструктивного элемента, поскольку предварительная оценка влияния других физических коэффициентов показала об их менее существенном влиянием на величину и знак формирования напряжений на поверхности.

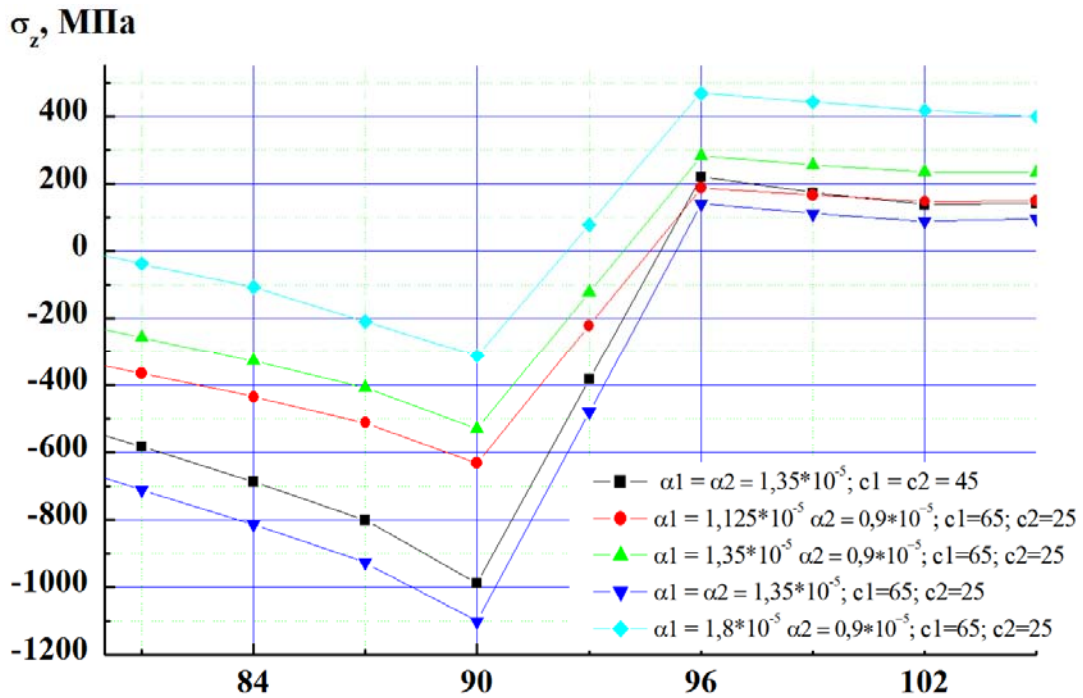


Рисунок 3 – Влияние изменения КТР основы при однослойной наплавке на формирование напряжений в ролике МНЛЗ. Диаметр ролика внешний  $D = 300$  мм;  $d_1$ - диаметр основы ролика = 270 мм; Толщина слоя:  $t_1 = 15$  мм.

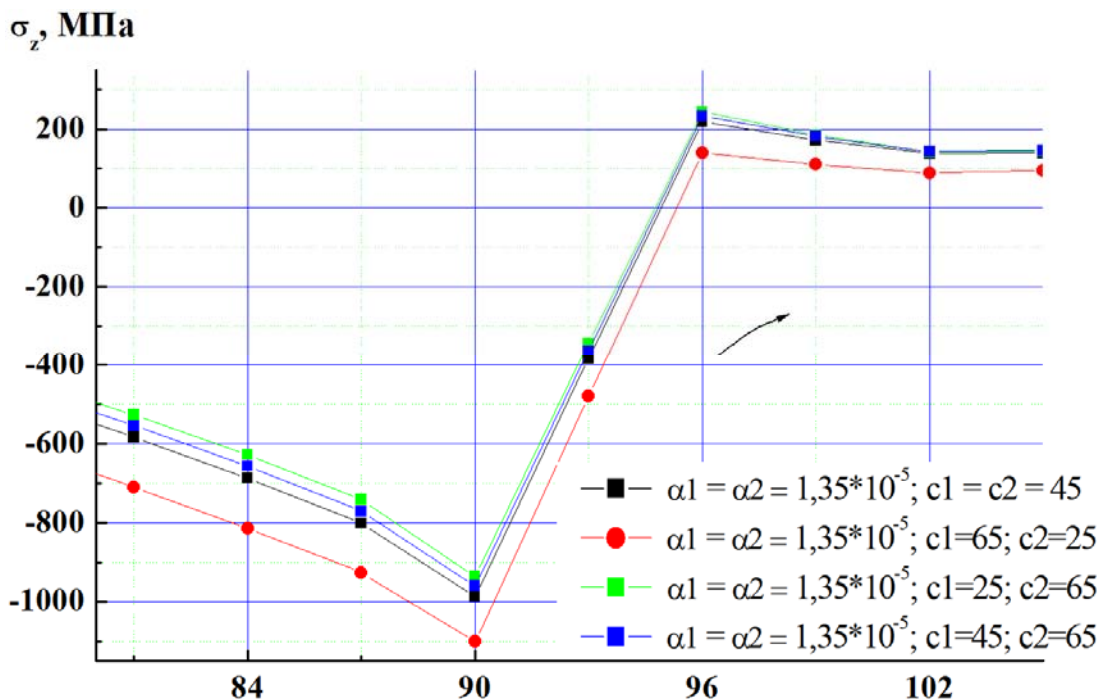


Рисунок 4 – Влияние коэффициента теплопроводности основы и наплавки при однослойной наплавке на формирование напряжений в ролике МНЛЗ. Диаметр ролика внешний  $D = 300$  мм;  $d_1$ - диаметр основы ролика = 270 мм; Толщина слоя:  $t_1 = 15$  мм.

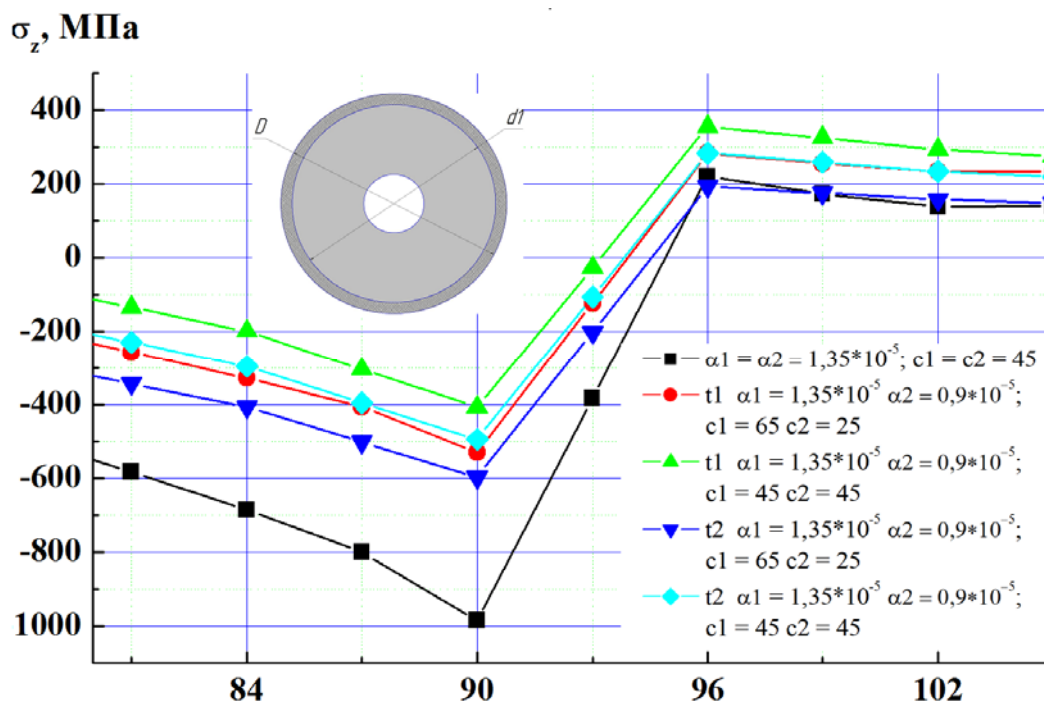


Рисунок 5 – Влияние толщины металла верхнего слоя композита с отличающимися от основы теплофизическими свойствами на формирование поля напряжений в ролике МНЛЗ. Диаметр ролика внешний  $D = 300\text{мм}$ ;  $d_1$ - диаметр основы ролика =  $270\text{мм}$ ;  $d_2$ - диаметр основы ролика =  $240\text{мм}$ ;  $t_1$  - толщина верхнего слоя =  $15\text{мм}$ ;  $t_2$  - толщина верхнего слоя =  $30\text{мм}$ .

Однако следует ожидать, что при комбинации различных физических коэффициентов можно получить не полезную информацию для рационального выбора комбинации материалов для биметаллического ролика. На полученную разработку использования влияния соотношений теплофизических и механических свойств металлов композита и основы на НДС роликов МНЛЗ в условиях термоциклирования получен патент Украины [5].

**Методика расчета повреждений и долговечности до появления трещины в ролике.** Для определения повреждений за один эксплуатационный цикл и долговечности до появления трещины в биметаллическом ролике используется модель предельного исчерпания пластичности [6-7]. Модель была расширена на случай асимметричного циклического нагружения в неизотермических условиях. Основные выкладки по модели приведены ниже. Входными данными для модели есть экспериментальные кривые многоциклового усталости построенные для серии разных постоянных температур, а также изотермические диаграммы циклического деформирования. Далее рассмотрены основные положения модели предельного исчерпания пластичности, предложенной авторами ранее [6-7], примененной для определения долговечности при термомеханическом



нагрузении. Эта модель, с учетом новых предположений и принятием других исходных данных, адаптирована к области малоциклового термоусталости. Для описания процесса упрочнения - разупрочнения материала, который выражается в изменении локального циклического предела текучести (ЛЦПТ), введем функцию исчерпания пластичности в виде рекуррентной функции. Текущее значение ЛЦПТ на  $(i+1)$ -ом полуцикле через текущее значение первой производной неопределенного аналитического уравнения диаграммы циклического исчерпания пластичности –  $(\partial f(\varepsilon_{ine})/\partial \varepsilon_{ine})|_{\varepsilon_{ine,i}}$  запишется как:

$$\sigma_{T,i+1} = \sigma_{T,i} \pm \frac{\partial f(\varepsilon_{ine})}{\partial \varepsilon_{ine}} \Big|_{\varepsilon_{ine,i}} \cdot \left( \varepsilon_{ine,i} \pm \frac{\Delta \sigma_{T,i}}{E} \cdot T_1 \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_{T,i+1}, \sigma_{T,i}$  – ЛЦПТ в  $(i+1)$ -ом и  $i$ -ом полуциклах нагружения, соответственно, причем  $i \in 0 \dots 2N$ , а  $N$  – количество циклов до разрушения при заданной амплитуде циклического напряжения  $\sigma_a$ ;  $\Delta \sigma_{T,i}$  – прирост ЛЦПТ в процессе наработки от  $i$ -того полуцикла к  $(i+1)$ -ому;  $f(\varepsilon_{ine})$  – функция исчерпания пластичности;  $E$  – модуль упругости  $I$ -ого рода;  $\varepsilon_{ine}, \varepsilon_{ine,i}$  – амплитуда неупругой деформации и ее значение в  $i$ -ом цикле нагружения;  $T_1$  – триггер, который определяет учет добавочной неупругости ( $T_1 \in \{0;1\}$ ).

После преобразования уравнения (1), получим:

$$\sigma_{T,i+1} = \sigma_{T,i} + \frac{df(\varepsilon_{ine})}{d\varepsilon_{ine}} \cdot \left( \pm 1 - \frac{df(\varepsilon_{ine})}{d\varepsilon_{ine}} \cdot \left( T_2 \pm \frac{T_1}{E} \right) \right)^{-1} \Big|_{\varepsilon_{ine,i}} \cdot \varepsilon_{ine,i}. \quad (2)$$

где  $T_2$  – триггер, который определяет учет производной ( $T_2 \in \{0;1\}$ ).

Зависимость (2) представляет собой уравнение для определения прироста ЛЦПТ в каждом полуцикле нагружения в рекуррентной форме.

Граничные условия для дифференциального уравнения, полученного путем преобразования (2), исходя из постулатов модели, имеют вид:

$$\sigma_T(n=0) = \sigma_{T,0}; \quad \sigma_T(n=2N) = \sigma_{T,cr}. \quad (3)$$

где  $\sigma_T, \sigma_{T,0}, \sigma_{T,cr}$  – текущее, исходное и критическое значения ЛЦПТ;  $n$  – текущее количество полуциклов.

Проинтегрировав дифференциальное уравнение, построенное на (2), и выставив границы интегрирования, исходя из (3), получим:

$$N = \frac{1}{2} \cdot \int_{\sigma_{T,0}}^{\sigma_{T,cr}} \left( \pm \left( \frac{df(\varepsilon_{ine})}{d\varepsilon_{ine}} \right)^{-1} - \left( T_2 \pm \frac{T_1}{E} \right) \right) \frac{d\sigma_T}{\varepsilon_{ine}}. \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой уравнение кривой усталости, составленное для предельного состояния при циклическом нагружении.

Далее приведена методика определения изотермических кривых усталости в условиях асимметричного цикла для серии разных постоянных

температур. Экспериментальные данные, для каждого уровня температуры аппроксимированы полулогарифмической зависимостью:

$$N(\sigma_a, T) = 10^{A_\sigma(T) + B_\sigma(T) \cdot \sigma_a} \quad (5)$$

$$\sigma_a(N, T) = \frac{\lg(N) - A_\sigma(T)}{B_\sigma(T)} \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) при найденных функциях параметров  $A_\sigma$  и  $B_\sigma$  от температуры дают непрерывное представление изотермических кривых усталости. То есть уравнения (5) и (6) представляют аналитическую запись гиперповерхности, связывающей амплитудные напряжения, число циклов до разрушения и температуру испытаний.

Для применения модели при асимметричном цикле нагружения необходимо выразить семейство кривых усталости при разных асимметриях цикла через исходную кривую усталости. При этом для одной и той же долговечности взаимосвязь между амплитудой напряжения и средним напряжением в цикле можно выразить как:

$$\sigma_a^r = f(\sigma_a^{-1}, \sigma_m) \quad (7)$$

где  $r$  – коэффициент асимметрии цикла;  $\sigma_a^{-1}$  – амплитуда напряжения по кривой усталости для симметричного цикла;  $\sigma_a^r$  – амплитуда напряжения при коэффициенте асимметрии  $r$ , соответствующая долговечности при  $\sigma_a^{-1}$ .

Самой распространенной такой связью есть линейная. То есть можно записать что связь между амплитудным и средним напряжениями в цикле может быть записана как:

$$\sigma_a^r = \sigma_a^{-1} \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{creep}} \right) \quad (8)$$

где  $\sigma_{creep}$  – предельное напряжение вязкого разрушения, определяемое по предельным кривым длительной прочности, для заданной длительности и температуры.

Напряжение  $\sigma_{creep}$  есть функция от температуры, то есть  $\sigma_{creep} = f(T)$ .

Коэффициент асимметрии цикла выражается как отношение максимального  $\sigma_{max}$  номинального  $\sigma_{min}$  напряжений в цикле:

$$r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (9)$$

Взаимосвязь  $\sigma_{max}$  и  $\sigma_{min}$  с  $\sigma_m$  и  $\sigma_a$  выглядит:

$$\begin{aligned} \sigma_{min} &= \sigma_m - \sigma_a^r \\ \sigma_{max} &= \sigma_m + \sigma_a^r \end{aligned} \quad (10)$$

Из (9) и (10) получаем:

$$r = \frac{\sigma_m - \sigma_a^r}{\sigma_m + \sigma_a^r} \quad (11)$$

Откуда значение среднего напряжения цикла через коэффициент асимметрии и амплитудное значение напряжения, выражается как:

$$\sigma_m = \frac{1+r}{1-r} \sigma_a^r \quad (12)$$

Подставляя выражения (12) в (8), после преобразований получаем:

$$\sigma_a^r = \sigma_a^{-1} - \frac{\sigma_a^{-1}}{\sigma_{creep}} \frac{1+r}{1-r} \sigma_a^r \quad (13)$$

Отсюда функция напряжения, эквивалентного по долговечности  $\sigma$ -1а при коэффициенте асимметрии  $r$  найдется как:

$$\sigma_a^r = \frac{\sigma_a^{-1}}{1 + \frac{\sigma_a^{-1}}{\sigma_{creep}} \frac{1+r}{1-r}} \quad (14)$$

Для нашего случая надо понимать вместо напряжения  $\sigma$ -1а, функцию кривой усталости в виде (6). Тогда используя выражение (14), кривые усталости для разных асимметрий и при разных температурах найдутся как:

$$\sigma_a(N, T, r) = \frac{\sigma_a(N, T)}{1 + \frac{\sigma_a(N, T)}{\sigma_{creep}(T)} \frac{1+r}{1-r}} \quad (15)$$

Подставляя (6) в зависимость (15) и далее выражения для параметров  $A_\sigma$  и  $B_\sigma$  от температуры, получаем окончательную зависимость для определения кривых усталости для разных асимметрий цикла.

При найденных функциях параметров  $A_\sigma(T)$  и  $B_\sigma(T)$  и функции напряжения  $\sigma_{creep}(T)$  от температуры уравнение (16) дает непрерывное представление изотермических кривых усталости при асимметричных циклах, то есть представляет аналитическую запись гиперповерхности, связывающей амплитуду напряжения, число циклов до разрушения, коэффициент асимметрии цикла и температуру испытаний.

### Выводы

1. Различие теплофизических и механических свойств материалов биметаллических композитов дает возможность управлять формированием НДС на поверхности деталей и конструктивных элементов, работающих в сложных условиях термомеханического воздействия, и таким образом



находить вариант сочетания материалов для повышения их долговечности.

2. Предложенный расчетный метод оценки влияния соотношения свойств металлических композитных материалов расширяет возможности для их более широкого применения в практике с учетом специфики эксплуатационного теплосилового нагружения и среды и более экономичного использования материалов.

3. На основе полученных расчетных НДС на примере направляющего ролика МНЛЗ показано, что из двух рассмотренных теплофизических коэффициентов (КЛР и КТ) наибольшее влияние на НДС ролика оказывает КЛР.

4. Приведена методика определения повреждений за один эксплуатационный цикл и долговечности до появления трещины в биметаллическом ролике. Для этого используется модель предельного исчерпания пластичности которая была расширена на случай асимметричного циклического нагружения в неизотермических условиях.

5. Приведенные результаты исследований могут быть использованы при экспертизе разрушений подобного рода изделий, при проектировании новых машин и оборудования, а также при ремонте ответственных элементов с целью не только восстановления их служебных свойств, но и для повышения их ресурса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Pangborn R.N., Weissmann S., Kramer J.R. Work hardening in the surface layer and in bulk during fatigue // Ser. Met.-1978.-12, N 2 –P. 129-131.

2. Sato Y., Sasaki H., Kumana A. Surface layer yielding of lowcarbon steel cylinders // J. Mater. Sci. Soc. Jap.- 1980.- 17, N ¾.- P. 185-192.

3. Miyazaki S., Shibata K., Fujita H. Effect of specimen tyicknes on Mechanical Properties of Polycrystalline Aggregates with Various grain sizes // Acta met.- 1979.-27, N 5. P 855-863.

4. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике (справочник), Под. Ред. Б.Е.Неймарк М.-Л, Изд-во: "Энергия", 1967, 240 с.

5. Патент на корисну модель UA 26266 U МПК (2006) B22D 11/12 Гопкало О.П., Кліпачевський В.В. "Ролик для машини безперервного лиття заготовок (слябів)" /опубл. 10.09.2007. Бюл. № 14.

6. Цыбанев Г.В., Новиков А.И. Расчетная модель предельного упрочнения материалов при многоциклового усталости и определение ее параметров / Цыбанев Г.В., Новиков А.И. // Пробл. прочности. – 2010. – №6. – С. 122 – 137.

7. Tsyban'ov G.V. Ultimate hardening/softening model of material for fatigue crack initiation onset and determination of its parameters [Текст] / G.V. Tsyban'ov, A.I. Novikov // International Journal of Fatigue. – 2012. – Volume 39. – P. 15 – 24.

