

## Термические напряжения в роликах машин непрерывного литья заготовок при варьировании свойств металлов основы и наплавки

*Рассмотрено влияние соотношений коэффициентов линейного расширения и теплопроводности, а также механических свойств основного металла и металла наплавки на формирование поля термических напряжений вблизи контакта ролика со слябом.*

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, термонапряжения, коэффициент линейного расширения (КЛР), коэффициент теплопроводности (КТ), термоупругость

**В**ведение. Вследствие высокой эффективности непрерывная разливка стали является наиболее приемлемым способом получения слябов, из которых изготавливают толсто- и тонколистовой прокат. При относительно большой ширине и толщине сляба ролика, которые работают в сложных условиях термомеханического нагружения, являются наиболее нагруженными и определяют ресурс машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Ролик в условиях эксплуатации удерживает перемещающийся слиток (сляб) на технологической оси МНЛЗ и подвергается циклическому нагреву в момент контакта со слябом при обильном охлаждении его свободной поверхности водой. Ролики МНЛЗ изготавливают из теплоустойчивых сталей, которые не всегда отвечают требованиям коррозионной стойкости. Поэтому на практике для повышения коррозионной стойкости роликов на его поверхность наплавляют слой металла с более высокими антикоррозионными характеристиками.

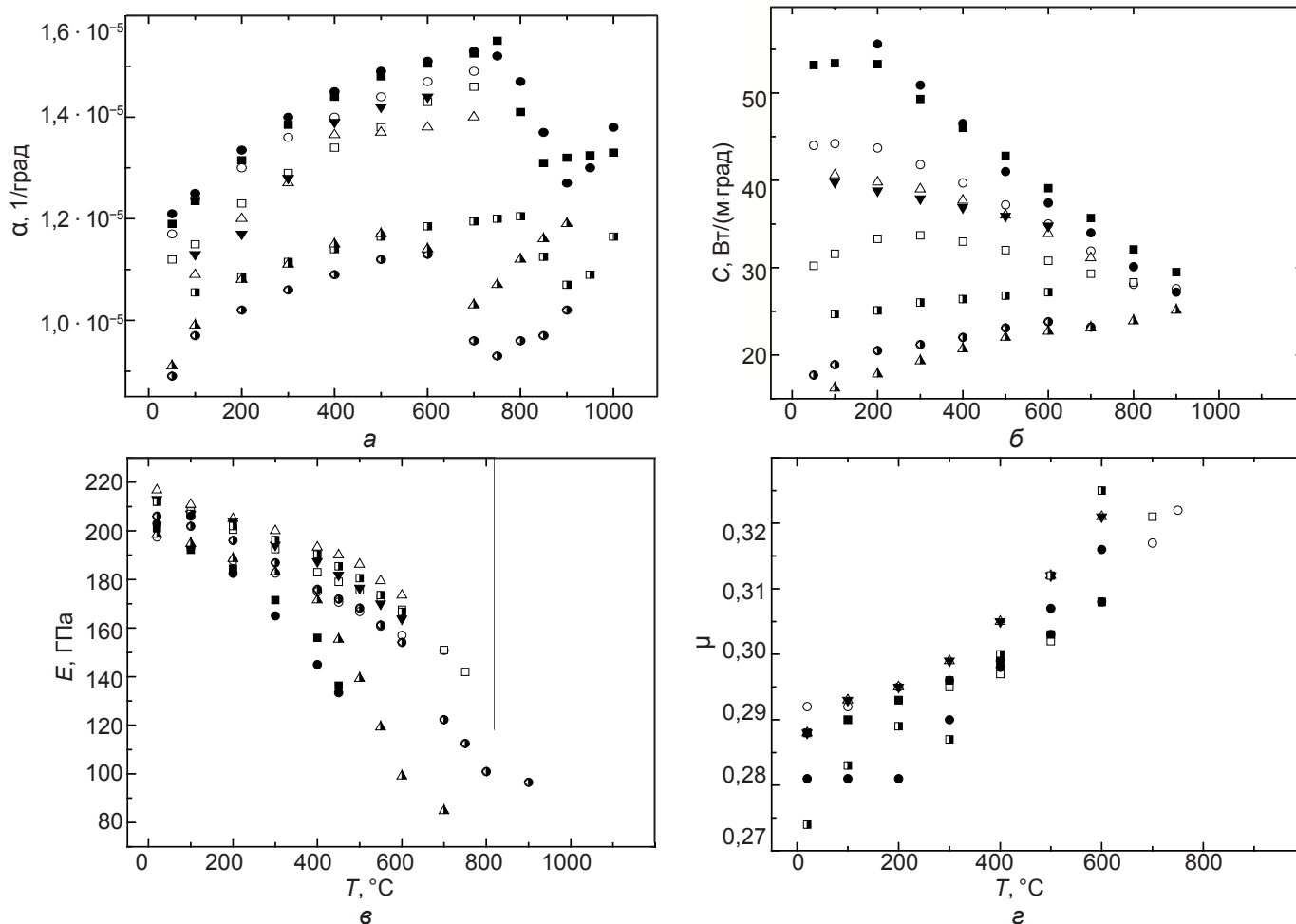
В инженерной практике при эксплуатации машин и оборудования процесс разрушения ответственных элементов часто начинается с локальных разрушений поверхностных слоев материала. Исходные механические свойства поверхностных слоев материала изменяются при изготовлении деталей и затем претерпевают дополнительные изменения, обусловленные последующей обработкой и эксплуатацией. В силу наличия свободной поверхности пластическое течение поверхностных слоев начинается раньше, чем сердцевинных из-за различия значений предела текучести поверхностных и внутренних слоев материала [1-5], в связи с чем для достижения их равнопрочности применяют различные технологии поверхностного упрочнения. В условиях термоциклирования и упрочнения поверхности путем наплавки металла с более высокими прочностными характеристиками на основной металл ролика ответ на вопрос о его термонагруженности, определяющей долговечность, остается неоднозначным и требует оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) с учетом соотношения теплофизических и механических свойств металлов основы и наплавки, включая ее толщину, а также толщины наплавки.

*Зависимость физико-механических свойств металлов от температуры.* При определении НДС в поверхностном слое ролика в условиях термоциклирования для решения задачи используются теплофизические характеристики материалов, упомянутые выше. В то же время эти характеристики не остаются постоянными при изменении температуры [6], что необходимо учитывать в решениях. Предварительные расчеты в упругой постановке задачи показывают, что на изменение НДС при варьировании свойств металлов основы и наплавки в условиях термоциклического нагружения наиболее существенное влияние оказывают КЛР, КТ, модуль упругости, коэффициент Пуассона. Зависимость этих величин от температуры для наиболее часто используемых в инженерной практике сталей на основе выборок из табличных данных работы [6] приведена на рис. 1.

Как следует из этих данных, при увеличении температуры от 100 до 650 °С происходит монотонное возрастание КЛР для сталей всех рассматриваемых классов (рис. 1, а), хотя с различной интенсивностью. Для углеродистых, низко- и среднелегированных сталей рост более интенсивный по сравнению с хромистыми нержавеющей стали. При температуре около 700 °С резко падает КЛР у сталей марок 0X15H7M2Ю и 0X17H4 с последующим новым ростом. Для низкоуглеродистых сталей и стали марки 1X12ВНМФ такие изменения происходят при более высоких температурах.

Данные по изменению КТ в зависимости от температуры свидетельствуют о том, что они различны для рассматриваемых классов сталей (рис. 1, б). Увеличение КТ с повышением температуры наблюдается только у хромистых нержавеющей сталей. У остальных сталей величина КТ снижается с повышением температуры. Наиболее интенсивное снижение происходит у углеродистых сталей, а у среднелегированной стали марки 15X2M2ФБС снижение КТ начинается после незначительного увеличения в области температур 50...300 °С.

Модуль упругости первого рода  $E$  снижается с увеличением температуры у всех анализируемых сталей (рис. 1, в). Начальное снижение (при повышении температуры от 0°) – более медленное, затем скорость уменьшения модуля повышается. Этот

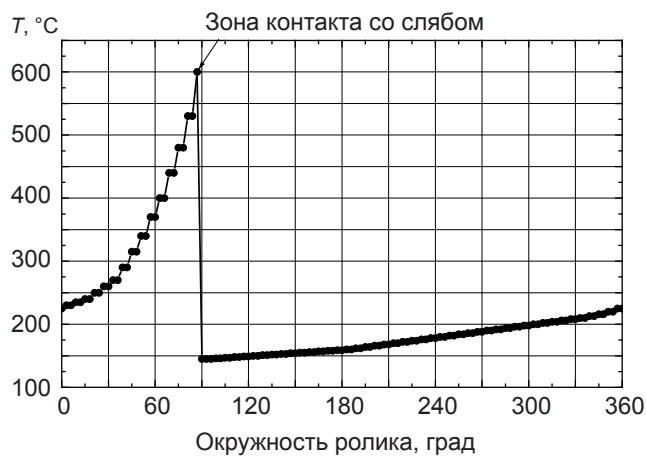


**Рис. 1.** Зависимости КЛР (а), КТ (б), модуля упругости первого рода (в) и коэффициента Пуассона (г) от температуры для углеродистых (● – сталь 08, ■ – сталь 15), низко- и среднелегированных (○ – 12X1M1Ф, □ – 15X2M2ФБС, △ – 25X1M1Ф, ▼ – 25X2MФА) марок стали; ▲ – 0X15H7M2Ю; ● – 0X17H4; ■ – 1X12ВНМФ

переход происходит при разных температурах для различных сталей. Раньше всего он наблюдается для углеродистых сталей (при превышении  $\approx 200$  °C), у остальных – после превышения температур 400-500 °C.

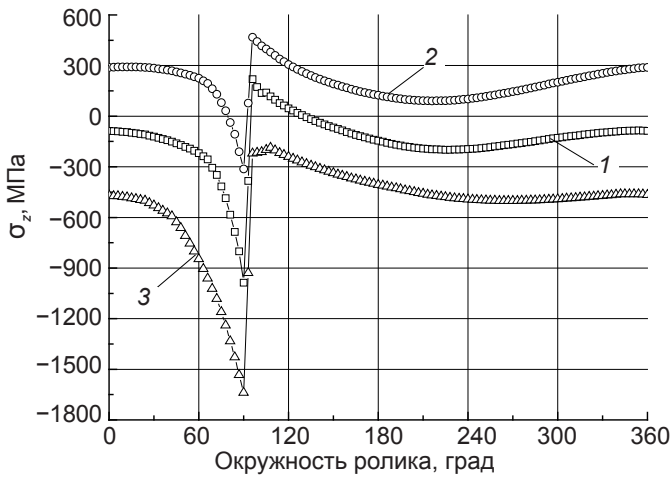
Изменение коэффициента Пуассона  $\mu$  при повышении температуры показано на рис. 1, г, из которого следует, что рост этого коэффициента с увеличением температуры происходит у всех рассмотренных сталей, хотя с некоторыми особенностями на начальном участке повышения температуры.

*Влияние отличий физико-механических свойств основного металла и металла наплавки на НДС ролика МНЛЗ.* Ниже приведено несколько характерных примеров по расчетной оценке влияния конкретных значений КЛР, КТ и толщины наплавленных слоев на НДС ролика в условиях реального температурного цикла. В качестве такого цикла принят температурный диапазон наиболее резкого изменения температуры на поверхности ролика МНЛЗ при его контакте со слябом (рис. 2) [7]. НДС ролика определяли методом конечных элементов путем решения задачи термоупругости на основе решения задачи теплопроводности. Влияние варьируемых физико-механических свойств поверхностного слоя и геометрических параметров роликов оценивали по величине термонапряжений  $\sigma_z$  в поверхностном слое наплавки вдоль его продольной оси, которые являются причиной зарождения и роста трещин термоусталости в эксплуатации.



**Рис. 2.** Распределение температур по окружности ролика в эксплуатационном термоцикле [7]

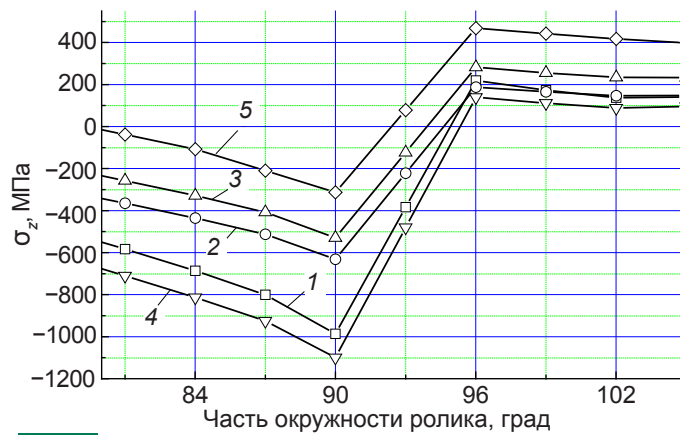
На рис. 3 приведена схема ролика с одним слоем наплавки и эпюры термических напряжений на его поверхности в части окружности ролика вблизи зоны его контакта со слябом при варьировании физических и механических характеристик металлов наплавки. Значения варьируемых величин КЛР (а) и КТ (с) для металлов основы и наплавки указаны в подрисуночной надписи. Полагается, что при равенстве физических и механических характеристик металлов наплавки и основы ролик – монолитный (без наплавки). Рассмотрено влияние соотношения КЛР основного металла и металла наплавки на НДС



**Рис. 3.** Влияние соотношений КЛР основного металла и металла наплавки на распределение термонапряжений по поверхности ролика МНЛЗ.  $\varnothing$  ролика (мм): внешний  $D = 300$ , основы –  $d_1 = 270$ ; толщина (мм) слоя:  $t_1 = 15$ ; КТ:  $c_1$  – основы;  $c_2$  – слоя 1; КЛР:  $\alpha_1$  – основы,  $\alpha_2$  – слоя 1; 1 –  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ;  $c_1 = c_2 = 45$ ; 2 –  $\alpha_1 = 1,8 \cdot 10^{-5}$ ,  $\alpha_2 = 1,9 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_1 = 65$ ,  $c_2 = 25$ ; 3 –  $\alpha_1 = 1,9 \cdot 10^{-5}$ ,  $\alpha_2 = 1,8 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_1 = 65$ ,  $c_2 = 25$

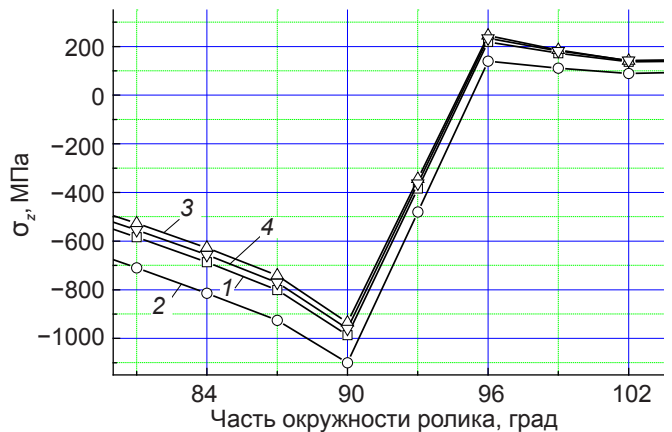
ролика при одинаковых значениях КТ. В данном случае при однослойной наплавке повышение в 2 раза значений КЛР металла наплавки относительно основного металла вызывает увеличение в 1,65 раза напряжений сжатия в наиболее напряженной зоне перед контактом ролика со слябом (кривая 3) по сравнению с соответствующими напряжениями для монолитного ролика (кривая 1). При этом в зоне контакта ролика со слябом на поверхности ролика также возникают напряжения сжатия в отличие от монолитного ролика, для которого характерны напряжения растяжения. Использование для наплавки металла со значениями КЛР в 2 раза меньшими, чем для основного металла, приводит к 3-кратному снижению напряжений сжатия в зоне перед контактом ролика со слябом (кривая 2) по сравнению с соответствующими напряжениями для монолитного ролика (кривая 1). При этом в зоне контакта ролика со слябом на поверхности ролика возникают напряжения растяжения, которые в 2,2 раза выше, чем для монолитного ролика.

На рис. 4 показано влияние соотношения значений КЛР и КТ основного металла и металла однослойной наплавки на формирование поля напряжений на поверхности ролика. Повышение значений КЛР и сохранение соотношения значений КТ основного металла относительно металла наплавки приводит к снижению значений напряжений сжатия в зоне перед контактом ролика со слябом и повышению значений напряжений растяжения в зоне контакта ролика со слябом (кривые 2, 3, 5) по сравнению с соответствующими напряжениями для монолитного ролика (кривая 1). При одинаковых значениях КЛР основного металла и металла наплавки повышение в 2,6 раза значений КТ основного металла относительно металла наплавки приводит в зоне перед контактом ролика со слябом к незначительному (на 10 %) повышению значений напряжений сжатия (кривая 4) по сравнению с соответствующими напряжениями для монолитного ролика (кривая 1). При этом



**Рис. 4.** Влияние теплофизических коэффициентов при однослойной наплавке на формирование поля напряжений в ролике МНЛЗ.  $\varnothing$  ролика (мм): внешний  $D = 300$ ;  $\varnothing$  основы –  $d_1 = 270$ ; толщина слоя (мм):  $t_1 = 15$ ; КТ: основы –  $c_1$ , слоя 1 –  $c_2$ ; КЛР: основы –  $\alpha_1$ ; слоя 1 –  $\alpha_2$ ; 1 –  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ;  $c_1 = c_2 = 45$ ; 2 –  $\alpha_1 = 1,125 \cdot 10^{-5}$ ,  $\alpha_2 = 0,9 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_1 = 65$ ,  $c_2 = 25$ ; 3 –  $\alpha_1 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ;  $\alpha_2 = 0,9 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_1 = 65$ ,  $c_2 = 25$ ; 4 –  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_1 = 65$ ,  $c_2 = 25$ ; 5 –  $\alpha_1 = 1,8 \cdot 10^{-5}$ ;  $\alpha_2 = 0,9 \cdot 10^{-5}$ ;  $c_1 = 65$ ;  $c_2 = 25$

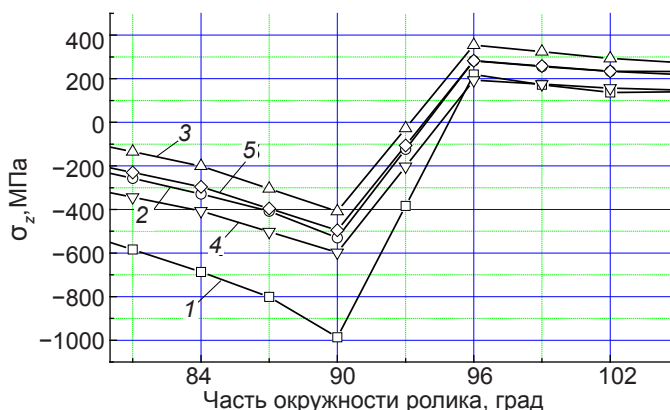
в зоне контакта ролика со слябом напряжения растяжения снижаются в 1,8 раза (кривая 4) по сравнению с соответствующими напряжениями для монолитного ролика (кривая 1). Однако при одинаковых значениях КЛР основного металла и металла наплавки (рис. 5) повышение в 1,4-2,6 раза значений КТ для металла наплавки относительно основного металла



**Рис. 5.** Влияние соотношений КТ основного металла и металла наплавки на формирование поля напряжений на поверхности ролика МНЛЗ.  $\varnothing$  ролика (мм): внешний –  $D = 300$ , основы –  $d_1 = 270$ ; толщина (мм) слоя –  $t_1 = 15$ ; КТ: основы –  $c_1$ , слоя 1 –  $c_2$ ; КЛР: основы –  $\alpha_1$ , слоя 1 –  $\alpha_2$ ; 1 –  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_1 = c_2 = 45$ ; 2 –  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_1 = 65$ ,  $c_2 = 25$ ; 3 –  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_1 = 25$ ,  $c_2 = 65$ ; 4 –  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_1 = 45$ ,  $c_2 = 65$

практически не влияет на значения напряжений как в зоне перед контактом ролика со слябом, так и в зоне контакта (кривые 3, 4) по сравнению с соответствующими напряжениями для монолитного ролика (кривая 1). В то же время при одинаковых значениях КЛР основного металла и металла наплавки повышение в 2,6 раза значений КТ основного металла относительно металла наплавки приводит к повышению на 10 % напряжений сжатия в зоне перед контактом ролика со слябом (кривая 2) и 2-кратному снижению напряжений растяжения в зоне контакта ролика со слябом по сравнению с соответствующими напряжениями для монолитного ролика (кривая 1).

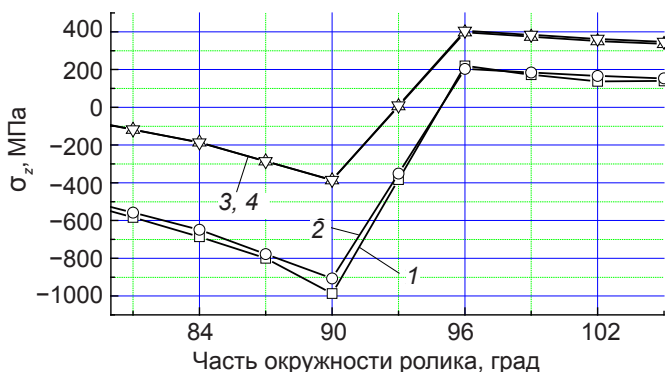
Сравнение влияния толщины наплавки 15 и 30 мм на термонапряжения поверхности ролика МНЛЗ при одинаковых значениях КЛР и КТ (рис. 6) показывает, что слой наплавки толщиной 15 мм в зоне перед кон-



**Рис. 6.** Влияние толщины металла наплавки с отличающимися от основы теплофизическими свойствами на термонапряжения на поверхности ролика МНЛЗ.  $\varnothing$  (мм): ролика внешнего –  $D = 300$ ; основы ролика –  $d_1 = 270$ ,  $d_2 = 240$ ; толщина (мм): верхнего слоя –  $t_1 = 15$ ,  $t_2 = 30$ ; КТ: основы –  $c_1$ , верхнего слоя –  $c_2$ ; КЛР: основы –  $\alpha_1$ ; верхнего слоя –  $\alpha_2$ . 1 –  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ;  $c_1 = c_2 = 45$ ; 2 –  $t_1 \alpha_1 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ;  $\alpha_2 = 0,9 \cdot 10^{-5}$ ;  $c_1 = 65$ ;  $c_2 = 25$ ; 3 –  $t_1 \alpha_1 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ;  $\alpha_2 = 0,9 \cdot 10^{-5}$ ;  $c_1 = 45$ ;  $c_2 = 45$ ; 4 –  $t_2$ ,  $\alpha_1 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ;  $\alpha_2 = 0,9 \cdot 10^{-5}$ ;  $c_1 = 65$ ;  $c_2 = 25$ ; 5 –  $t_2$ ,  $\alpha_1 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ;  $\alpha_2 = 0,9 \cdot 10^{-5}$ ;  $c_1 = 45$ ;  $c_2 = 45$

тактом ролика со слябом (кривая 2) дает более существенное снижение напряжений сжатия по сравнению с напряжениями для монолитного ролика (кривая 1), чем при толщине наплавки 30 мм (кривая 4). Однако при этом наблюдается некоторое увеличение напряжений в растягивающей фазе цикла. При расчетах толщина наплавки в используемых роликах выбрана в диапазоне их реального изменения.

На рис. 7 приведена схема ролика с двумя слоями наплавки и эпюры термических напряжений на его поверхности в части окружности ролика вблизи зоны его контакта со слябом при варьировании физических и механических характеристик металлов наплавки. Приведенные результаты показывают, что повышение на 18 % значений КЛР и в 2,6 раза зна-



**Рис. 7.** Влияние теплофизических коэффициентов на распределение термонапряжений по поверхности ролика МНЛЗ при двухслойной наплавке.  $\varnothing$  (мм): ролика внешнего –  $D = 300$ ; основы ролика –  $d_1 = 240$ ; толщина слоя (мм): верхнего слоя –  $t_1 = 15$ ,  $t_2 = 15$ ; КТ: основы –  $c_1$ , слоя 1 –  $c_2$ , слоя 2 –  $c_3$ ; КЛР: основы –  $\alpha_1$ ; слоя 1 –  $\alpha_2$ , слоя 2 –  $\alpha_3$ . 1 –  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ;  $c_1 = c_2 = c_3 = 45$ ; 2 –  $\alpha_1 = 1,463 \cdot 10^{-5}$ ;  $\alpha_2 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ;  $\alpha_3 = 1,238 \cdot 10^{-5}$ ;  $c_1 = c_2 = 65$ ;  $c_3 = 25$ ; 3 –  $\alpha_1 = 1,8 \cdot 10^{-5}$ ;  $\alpha_2 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ;  $\alpha_3 = 0,9 \cdot 10^{-5}$ ;  $c_1 = 65$ ;  $c_2 = 45$ ;  $c_3 = 25$ ; 4 –  $\alpha_1 = 1,8 \cdot 10^{-5}$ ;  $\alpha_2 = 1,35 \cdot 10^{-5}$ ;  $\alpha_3 = 0,9 \cdot 10^{-5}$ ;  $c_1 = c_2 = 65$ ;  $c_3 = 25$

чений КТ металла основы относительно металла наплавки приводит к снижению на 11 % напряжений сжатия по сравнению с соответствующими напряжениями для монолитного ролика и, практически, не влияет на величину напряжений растяжения (кривые 1 и 2). Повышение в 2 раза значений КЛР и в 2,6 – значений КТ для основного металла по отношению к металлу наплавки вызывает снижение в 2,5 раза (с 1000 до 400 МПа) напряжений сжатия в зоне перед контактом ролика со слябом и повышение в 2 раза (с 200 до 400 МПа) – напряжений растяжения в зоне контакта по сравнению с соответствующими напряжениями для монолитного ролика. При этом наличие промежуточного слоя металла со значениями КТ 45 Вт/(м·град.), практически, не влияет на распределение и величину напряжений  $\sigma_z$  (кривые 3 и 4).

Из приведенных данных следует, что проанализированные теплофизические коэффициенты оказывают влияние на величину и распределение термонапряжений по поверхности ролика в термоцикле в зависимости от их соотношения в металлах основы и наплавки. Варьированием этих соотношений можно регулировать величину и знак напряжений на поверхности ролика МНЛЗ. Величина напряжений растяжения и сжатия в рассмотренном термоцикле также зависит от толщины слоя наплавки.

Полученные результаты оценки термонапряжений  $\sigma_z$  от влияния варьирования соотношения значений КЛР и КТ материала наплавки и основы и их механических свойств следует рассматривать в комплексе с воздействием механических нагрузок, связанных с весом сляба и собственным весом роликов, а также действием усилий от разгиба сляба при переходе от криволинейного участка технологической оси МНЛЗ к прямолинейному. Поскольку оценка термонапряжений  $\sigma_z$  проводилась в упругой постановке, то необходимо учитывать влияние остаточных напряжений, возникающих при термических напряжениях, превышающих условный предел текучести.

На полученную разработку использования влияния соотношений теплофизических и механических свойств основного металла и металла наплавки на НДС роликов МНЛЗ получен патент Украины [8].

## Выводы

С использованием численного решения задач термоупругости и теплопроводности для ролика с наплавкой показано существенное влияние соотношений коэффициентов линейного расширения и теплопроводности металлов основы и наплавки, а также их механических свойств на величину и распределение термонапряжений по контактирующей со слябом поверхности ролика МНЛЗ.

Варьированием соотношений значений КЛР, КТ материала наплавки и основы а также их механических свойств можно регулировать величину и знак напряжений на поверхности ролика МНЛЗ, включая выведение этих напряжений в область только сжимающих. Расчетная оптимизация этих соотношений с учетом эксплуатационных механических нагрузок может дать решение для повышения долговечности роликов МНЛЗ.



Толщина наплавки ролика МНЛЗ может быть определена по использованной расчетной модели для получения минимальных сжимающих и растягивающих напряжений на поверхности ролика в термоцикле.

Для условий термомеханического нагружения метод варьирования соотношений значений КЛР и КТ

материала наплавки и основы, а также их механических свойств может быть использован для обоснования повышения долговечности проектируемых новых машин и оборудования, при ремонте ответственных элементов с целью не только восстановления их служебных свойств, но и для повышения ресурса.



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Алехин В. П.* Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. – М.: Наука, 1983. – 280 с.
2. *Прокопенко А. В., Торгов В. Н.* Поверхностные свойства и предел выносливости металла. Сообщение 1. Зависимость предела текучести от глубины слоя // Пробл. прочности. – 1986. – № 4. – С. 28-34.
3. *Pangborn R. N., Weissmann S., Kramer J.* Work hardening in the surface layer and in bulk during fatigue // Ser. Met. – 1978. – 12, № 2 – P. 129-131.
4. *Sato Y., Sasaki H., Kumana A.* Surface layer yielding of lowcarbon steel cylinders // J. Mater. Sci. Soc. Jap. – 1980. – 17, № 3-4. – P. 185-192.
5. *Miyazaki S., Shibata K., Fujita H.* Effect of specimen thycnes on Mechanical Properties of Polycrystalline Aggregates with Various grain sizes // Acta met. – 1979. – 27, № 5. – P 855-863.
6. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник // Под. ред. Б. Е. Неймарк. – М.;Л.: Энергия, 1967. – 240 с.
7. Отчет о научно-исследовательской работе № 34000122/82831784(709 – 1) н/3 7082-381 «Исследование условий эксплуатации и разработка новых конструкций роликов повышенной стойкости для МНЛЗ» (Заключительный). М.: ВНИИМЕТМАШ. – 1983. – 79 с.
8. Пат. UA 26266 U МПК (2006) B22D 11/12 Ролик для машины безперервного лиття заготовок (слябів) / Гопкало О. П., Кліпачевський В. В. Оубл. 10.09.2007. Бюл. № 14.

### Анотація

*Гопкало О. П., Цибаньов Г. В., Кліпачевський В. В.*

**Термічні напруження у двошарових роликах машин безперервного лиття заготовок при варіюванні властивостей металів основи і наплавки**

*Розглянуто вплив співвідношень коефіцієнтів лінійного розширення та теплопровідності, а також механічних властивостей основного металу та металу наплавки на формування поля напружень поряд з контактом ролика зі слябом.*

### Ключові слова

*напружено-деформований стан, термонапруження, коефіцієнт лінійного розширення, коефіцієнт теплопровідності, термопружність*

### Summary

*Gopkalo A., Tsybanyov G., Klipachevsky V.*

**Thermal stresses in two-layer rollers for continuous billet casting machines under variation of the base and cladding metals properties**

*Influence of relation of linear expansion and heat conductivity factors, influence of stress-strain properties of parent metal and weld metal on formation of thermal stress field nearby roller and slab surfaces contact is considered.*

### Keywords

*mode of deformation, thermotension, linear expansion factor, heat conductivity factor, thermoelasticity*

Поступила 17.05.11